

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**SIMULAÇÃO E ANÁLISE DO PREENCHIMENTO DE
CAVIDADES EM MOLDES PARA INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS
UTILIZANDO MÉTODO MANUAL E TECNOLOGIA CAE/CAD**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

CHRISTIAN DIHLMANN

FLORIANÓPOLIS, NOVEMBRO DE 1993

SIMULAÇÃO E ANÁLISE DO PREENCHIMENTO DE
CAVIDADES EM MOLDES PARA INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS
UTILIZANDO MÉTODO MANUAL E TECNOLOGIA CAE/CAD

CHRISTIAN DIHLMANN

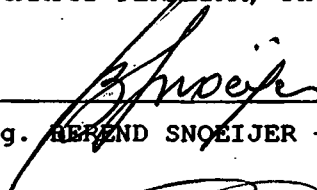
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

M E S T R E E M E N G E N H A R I A

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL
PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. AUREO CAMPOS FERREIRA, Ph.D. - Orientador

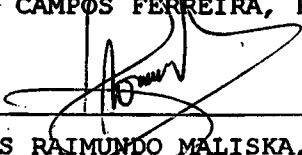


Prof. Dr.-Ing. HEND SNOEIJER - Coordenador CPGEM

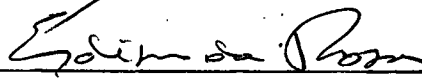
BANCA EXAMINADORA



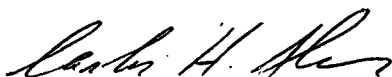
Prof. AUREO CAMPOS FERREIRA, Ph.D. - Presidente



Prof. CLÓVIS RAIMUNDO MALISKA, Ph.D.



Prof. EDISON DA ROSA, Dr. Eng.



Eng. CARLOS HENRIQUE AHRENS, M.Sc.

À Jacira, pelo apoio, compreensão e carinho com que me
acompanhou em mais esta etapa...

Ao Stephan, pela alegria...

Aos meus pais, pelo incentivo...

Agradecimentos:

Em especial, ao Prof. Aureo Campos Ferreira, pelo apoio e dedicação, não medindo esforços na busca de meios de suporte e oportunidades de estudo para que este trabalho fosse realizado da melhor forma possível...

Aos colegas do Grucon, pela discussão sobre o trabalho e pelas sugestões apresentadas...

Ao CNPq/RHAE pelo apoio financeiro...

À Molde Matos Lda. e ao SKZ - Süddeutsches Kunststoff-Zentrum pela oportunidade de aperfeiçoamento em suas instalações...

A Deus, por tudo...

Índice

LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
ZUSAMMENFASSUNG	xiv
 1. INTRODUÇÃO	 1
1.1. Definição dos Objetivos	5
1.2. Simulação e Análise do Preenchimento de Cavidades em Moldes para Injeção de Termoplásticos	7
 2. NOÇÕES BÁSICAS PARA A PRODUÇÃO DE PEÇAS DE PLÁSTICO PELO PROCESSO DE INJEÇÃO	 13
2.1. O Material: Plástico	13
2.2. Projeto da Peça de Plástico	16
2.2.1. Concepção da Idéia	16
2.2.2. Modelamento do Produto	17
2.3. Produção do Molde	17
2.3.1. Etapa de Projeto	18
2.3.2. Etapa de Fabricação	24
2.4. Processo de Injeção	25
2.4.1. Parâmetros de Injeção	27
2.4.2. Ciclo de Injeção	29
2.4.3. Comportamento do Plástico durante o Escoamento	30
 3. MÉTODO MANUAL PARA PREVISÃO DO PREENCHIMENTO DE CAVIDADES EM MOLDES PARA INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS	 37
3.1. Fundamentos Teóricos do Método da Imagem de Enchimento	41
3.2. Casos Básicos de Construção da Imagem de Enchimento	45
3.2.1. Caso Básico 1 - Placa de Espessura Constante com um Furo Quadrado	45

3.2.2. Caso Básico 2 - Placa de Espessura Constante com um Furo Redondo	47
3.2.3. Caso Básico 3 - Placa com Duas Espessuras de Parede Diferentes e Injeção na Área mais Espessa	48
3.2.4. Caso Básico 4 - Placa com Duas Espessuras de Parede Diferentes e Injeção na Área mais Fina ...	51
3.3. Utilização Simultânea dos Métodos	55
3.4. Recomendações para Aplicação dos Métodos	56
3.5. Preparação de uma Simulação com o Método Manual	57
3.6. Análise de Áreas Críticas	59
3.6.1. Linhas de Solda	59
3.6.2. Bolsas de Ar	61
3.7. Limitações do Método Manual	62
 4. SIMULAÇÃO ASSISTIDA POR COMPUTADOR DO PREENCHIMENTO DE CAVIDADES EM MOLDES PARA INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS	 64
4.1. Fundamentos Teóricos dos Programas de Simulação	65
4.2. Métodos de Resolução das Equações	70
4.2.1. Métodos Numéricos	71
4.2.2. Método Analítico	72
4.2.3. Método dos Segmentos Envolto	72
4.3. Simulação Bidimensional X Tridimensional do Fluxo do Plástico	73
4.3.1. Análise Bidimensional	76
4.3.2. Análise Tridimensional	77
4.3.3. Vantagens e Limitações	78
4.4. Análise Térmica do Molde	81
4.5. Análise Mecânica do Molde	83
 5. PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA PARA APLICAÇÃO DA ANÁLISE REOLÓGICA ASSISTIDA POR COMPUTADOR	 84
5.1. Exame Visual da Geometria da Peça	85
5.2. Seleção do Material e dos Parâmetros de Injeção	85
5.3. Criação do Modelo Computacional	88
5.3.1. Cavidade	89
5.3.2. Canal de Alimentação	90

5.4. Geração da Malha sobre o Modelo	91
5.5. Seleção dos Critérios de Simulação e Preparação dos Documentos de Registro	94
5.6. Simulação Propriamente Dita	95
5.7. Análise dos Resultados	96
5.7.1. Interpretação das Linhas Isobáricas	98
5.7.2. Interpretação das Linhas Isocrônicas	98
5.7.3. Interpretação das Linhas Isotérmicas	99
5.7.4. Interpretação Simultânea das Isobáricas e Isocrônicas	101
5.8. Regras para Otimização Reológica	102
5.8.1. Das Condições de Moldagem	102
5.8.2. Do Canal de Alimentação	104
5.8.3. Do Ponto de Entrada ("Gate")	105
5.8.4. Da Cavidade	106
5.9. Considerações sobre Empenamento	106
6. ESTUDO DE CASO PRÁTICO	110
6.1. Seleção dos Programas de Simulação Reológica	110
6.1.1. Programa TMConcept	111
6.1.2. Programa Moldflow	112
6.2. Metodologia Utilizada	113
6.3. Caso Prático: Escaninho para Papel	113
6.3.1. Solicitação de Otimização	114
6.3.2. Informações Iniciais	115
6.3.3. Análise da Peça Original	116
6.3.4. Otimização do Ponto de Injeção	120
6.3.5. Otimização das Condições de Injeção	122
6.3.6. Otimização do Material	123
6.3.7. Medidas Corretivas Sugeridas	126
6.4. Comparativo TMConcept X Moldflow	127
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	133
7.1. Sugestões para Continuidade do Trabalho	133
7.2. Conclusões	134
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
ANEXOS	149

LISTA DE TABELAS

Tabela	Legenda	Página
1	Exportações do setor de moldes portugueses em 1987, 1988 e 1989	2
2	Consumo de plásticos e número de empresas na América - Ano 1992	2
3	Vantagens e limitações da utilização de materiais plásticos em Engenharia	3
4	Alguns programas de simulação disponíveis no mercado mundial	11
5	Abreviações dos plásticos - DIN 7728	15
6	Valores de ϕ , Γ e S^ϕ	66
7	Bancos de dados de materiais	86
8	Relação de fornecedores do banco de dados CAMPUS	87
9	Interpretação das isobáricas	99
10	Interpretação das isocrônicas	100
11	Interpretação das isotérmicas	100
12	Interpretação simultânea das isobáricas e isocrônicas	101
13	Dados fornecidos pelo fabricante do escaninho	115
14	Dados técnicos do material Hüls V214	115
15	Tempos e equipamentos para geração do modelo eletrônico	118
16	Resultados da análise com parâmetros de injeção fornecidos pelo fabricante da peça	119
17	Resultados da análise com variação da posição do ponto de injeção (Material PS V214/Hüls)	121
18	Resultados da análise com variação do tempo de injeção, da temperatura do plástico e do diâmetro do ponto de injeção (Material PS V214/Hüls)	122
19	Dados técnicos dos materiais selecionados (Fabricante Hüls)	124
20	Resultados da análise com variação das características do material (Fabricante Hüls)	125
21	Tempos e equipamentos para geração do modelo eletrônico para o Moldflow	128
22	Resultados da análise comparativa entre TMConcept e Moldflow (Material PS V314/Hüls)	130
23	Variação percentual entre os resultados da análise comparativa TMConcept X Moldflow (diâmetro do ponto de injeção = 4 mm)	131
A1	Parâmetros admissíveis para os termoplásticos mais comuns	150

LISTA DE FIGURAS

Figura	Legenda	Página
1	Áreas de aplicação da simulação do processo de injeção de termoplásticos	9
2	Interrelação entre as etapas de projeto e fabricação de moldes	20
3	Representação em corte de um molde típico para injeção de termoplásticos	22
4	Detalhe de uma cavidade	24
5	Seqüência de operações num ciclo de moldagem por injeção	29
6	Esquema de uma máquina injetora e as fases de injeção	31
7	Etapas do preenchimento da cavidade: a) injeção; b) pressurização; c) compensação	31
8	Linha de solda formada por: a) fluxo desviado e posteriormente reencontrado; b) fluxo procedente de dois pontos	33
9	Linha de junta formada por escoamento a partir de dois pontos de injeção	33
10	Efeito de hesitação	34
11	Efeito de refluxo gerado por três pontos de injeção distintos	35
12	Efeito de rechupe por contração diferenciada	36
13	Comparativo entre: a) injeção progressiva de caixa; b) imagem de enchimento de caixa	39
14	Teoria de propagação de ondas	42
15	Caso básico 1: a) frentes de onda concêntricas; b) linhas de auxílio; c) frentes de onda e linha de solda nas regiões de sombra	46
16	Caso básico 2: a) frentes de onda concêntricas; b) linhas de auxílio a partir do círculo dividido; c) frentes de onda e linha de solda nas regiões de sombra	48
17	Escoamento em duas regiões de espessuras diferentes	49
18	Método das tangentes: a) frentes de onda concêntricas; b) pontos auxiliares; c) frentes de onda na região delgada	50
19	Método dos pontos de centro: a) definição do centro da frente de onda; b) frentes de onda na região delgada	51
20	Caso básico 4: a) frentes de onda concêntricas e linhas de auxílio; b) ponto na região II; c) frente de onda na região II	53
21	Determinação da frente de onda 3 na região mais fina	53
22	Caso básico 4: a) refluxo da região II para I; b) arco para traçagem da linha de refluxo; c) linha de refluxo e de solda	54
23	Determinação da posição do feixe principal FP	55
24	Utilização conjunta do método dos pontos de centro e das tangentes: a) para o 3º caso; b) para o 4º caso	56

Figura	Legenda	Página
25	Exemplos de planificação	59
26	Linhas de solda: a) fortemente marcada, baixa qualidade; b) fracamente marcada, qualidade superior	60
27	Bolsas de ar: a) situação crítica; b) situação favorável	61
28	Exemplo de formação de bolsa de ar	62
29	Equações básicas simplificadas para a condição unidimensional	68
30	Discretização em segmentos	69
31	Soluções para geometrias elementares	70
32	Métodos empregados em programas de simulação reológica	71
33	Modelamento de geometrias: a) 3D volumétrico; b) 3D em casca	78
34	Trocas térmicas em um molde: a) área de refrigeração; b) área de refrigeração ou aquecimento; c) troca de calor com o meio ambiente; d) troca de calor com a peça; e) troca de calor através do fluido de refrigeração	82
35	Modelo parcial em casca da base de um engradado	90
36	Canal de alimentação para engradado: a) modelo para a geração da malha; b) representação teórica das espessuras	91
37	Geração da malha de elementos finitos: a) manualmente; b) automaticamente	93
38	Curva pressão x tempo de injeção	96
39	Empenamento gerado por orientação do fluxo em placa com injeção central	107
40	Configuração causadora de empenamento por variação da cristalinidade	108
41	Empenamento por resfriamento diferenciado	108
42	Desenho do produto: escaninho	116
43	Adaptação de superfícies	117
44	Modelo de escaninho para papel gerado no AutoCad	118
45	Pressão de injeção utilizada pelo fabricante e obtida na simulação	120
46	Variações no posicionamento do ponto de injeção	120
47	Força de fechamento e pressão de injeção em função da posição do ponto de injeção	121
48	Força de fechamento e pressão de injeção em função do tempo de injeção e diâmetro do ponto de entrada	123
49	Força de fechamento e pressão de injeção em função do material e do diâmetro do ponto de injeção	125
50	Comparativo entre a pressão de injeção utilizada pelo fabricante e a obtida com parâmetros otimizados	126

Figura	Legenda	Página
51	Modelo de escaninho para papel gerado no Moldflow	127
52	Visualização do modelo geométrico (Programa Moldflow)	129
53	Visualização da distribuição de pressão (Programa Moldflow)	129
54	Visualização da distribuição de temperatura (Programa Moldflow)	130
55	Força de fechamento e pressão de injeção em função do diâmetro do ponto de injeção e do simulador utilizado	131

RESUMO

Face ao crescimento constante e promissor do setor de transformação de plásticos no mundo, é de vital importância a avaliação dos recursos de produção disponíveis para o bom desempenho da indústria de moldes.

Este trabalho visa introduzir alguns conceitos e termos, utilizados na área de injeção de plásticos, e apresentar metodologias de análise reológica, para a determinação prévia do comportamento do material, quando escoando no interior de uma cavidade.

Embora a maior ênfase seja dada à técnica de simulação assistida por computador, que está inserida no contexto da tecnologia CAE (Engenharia Auxiliada por Computador), e que exige, por sua natureza, altos investimentos, também é apresentado o método manual para previsão do fluxo do plástico, permitindo a obtenção de resultados menos precisos, mas, em muitos casos, satisfatórios, a um custo extremamente reduzido.

Os critérios para a otimização do preenchimento da cavidade, apresentados juntamente com a proposta de uma sistemática para realização da simulação, propiciam uma forma de minimizar os erros de fabricação, permitindo, desta forma, reduzir drasticamente os eventuais custos de alteração do molde.

Resultados obtidos com a simulação e análise de casos práticos ilustram o trabalho, a medida que apresentam um comparativo realizado entre dois programas comerciais de avaliação reológica.

ABSTRACT

In face of the steady and promissory growth of the worldwide plastic area, the evaluation of the available production resources for a good performance of the moldmakers industry is very important.

This work intend to introduce some concepts and terms, applied in the plastics injection area, and to present a methodology for rheological analysis, which enable the previous determination of the material behavior, when it is flowing inside of a cavity.

The greatest emphasis of this work is the computer aided simulation technique, within the CAE (Computer Aided Engineering) concept, which requires high investments. Although a manual method, presented in this work, to predict the material flow results in a lower precision, in many cases, it is quite convenient and good enough because the costs envolved are very low.

The cavity filling optimization parameters presented with a proposal of a simulation methodology are a way to minimize the production problems, allowing to reduce drastically the eventual mold change costs.

The results obtained with a pratical case study illustrate this work and present a comparative test between two commercial programs.

ZUSAMMENFASSUNG

Auf Grund des konstanten, schnellen Anwachsens der weltweit Produktion auf dem vielversprechenden Gebiete der Kunststoffverarbeitung, ist die richtige Einschätzung der zur Verfügung stehenden Produktionsmittel für die nationale Industrie der Spritzgußwerkzeuge von entscheidender Bedeutung.

Die vorliegende Arbeit schlägt einige neue, auf dem Gebiet der Kunststoffeinspritzung zu benutzende Auffassungen, sowie neue Fachausdrücke vor und führt eine Methode der rheologischen Auslegung ein, um vorausschauend das Verhalten des Materials beim Einfließen in Hohlräume festzulegen.

Obgleich einerseits der Hauptwert dieser Arbeit auf die Technik der Rechner unterstützten Simulation gelegt wird, beinhaltet in der Technologie CAE (Computer Aided Engineering), die von Grund aus hohe Investitionskosten verlangt, behandelt andererseits der Verfasser eine wesentlich billigere, in den meisten Fällen ausreichend genaue, zeichnerische Methode (Füllbildmethode), um im voraus den Fluß des Kunststoffmaterials zu zeigen.

Die Bedingungen zur optimalen Füllung von Hohlkörpern, vereinigt mit dem Vorschlag zur systematischen Simulation, bewirken ein Minimum von Fehlern in der Produktion und damit eine drastische Kostensenkung der Spritzgußformen und eventueller notwendiger Änderungen an ihnen.

Aus der Praxis stammenden Beispiele der Simulation und Analyse erläutern diese Arbeit und zeigen den Unterschied einer rheologischen Auslegung zwischen zwei kommerziellen Programmen.

C A P Í T U L O 1

1. INTRODUÇÃO

O estágio atual de desenvolvimento no setor de polímeros vem fortificando a posição deste material no consumo mundial de matérias-primas manufaturáveis. Os produtos de plástico têm penetrado em várias áreas de aplicação, especialmente nos setores automobilístico, eletroeletrônico, de embalagens, aeronáutico, médico e de peças técnicas de alta qualidade. Em síntese, a gradual substituição de peças metálicas e de outros materiais por peças fabricadas em plástico, tem-se tornado cada vez mais evidente, dependendo, naturalmente, da área de aplicação [1, 2, 3].

O mercado de transformação de plásticos no Brasil tem crescido, na última década, de forma constante e promissora [4]. Por exemplo, o consumo de moldes* para plásticos e borrachas apresentou um crescimento elevado no ano de 1988 em relação a 1987, como mostra a Tabela 1. Apesar da queda em 1989, o setor continuou crescendo e o Brasil atingiu a marca de segundo maior consumidor de plásticos na América em 1992, superando inclusive o Canadá, como indica a Tabela 2.

Apesar de toda esta evolução, a utilização racional de materiais plásticos exige considerações especiais, que não se aplicam a outros materiais, como aço, madeira, etc. A Tabela 3 apresenta uma comparação entre as vantagens e limitações dos

* Fabricados em Portugal

materiais plásticos, que devem ser levadas em consideração, quando do projeto de uma nova peça ou quando da seleção do plástico mais adequado.

Tabela 1 - Exportações do setor de moldes portugueses em 1987, 1988 e 1989 [5, 6]

Principais Importadores	Toneladas 1987	Toneladas 1988	Toneladas 1989	% 88/87	% 89/88
E.U.A.	1.660	1.195	1.186	- 28,0	- 1,0
Inglaterra	213	271	393	+ 27,0	+ 45,0
França	243	247	222	+ 2,0	- 10,0
Alemanha Ocidental	149	222	348	+ 49,0	+ 57,0
Holanda	84	156	151	+ 86,0	- 3,0
Israel	43	118	94	+ 174,0	- 20,0
Suécia	106	95	124	- 10,0	+ 30,0
BRASIL	13	80	21	+ 515,0	- 74,0
Espanha	50	51	151	+ 2,0	+ 196,0
URSS	39	19	-	- 51,0	-
Canadá	25	29	-	+ 16,0	-
Marrocos	13	19	-	+ 46,0	-
Bélgica	8	14	-	+ 75,0	-
Outros Países	257	258	258	+ 0,4	-

Tabela 2 - Consumo de plásticos e número de empresas na América - Ano 1992 [7]

País	Toneladas x 1000	%	Quantidade Empresas	%
E.U.A.	27.000	78,2	15.000	47,0
Brasil	2.120	6,1	5.000	16,0
Canadá	1.950	5,6	5.000	16,0
México	1.330	3,8	3.000	9,0
Argentina	560	1,6	2.200	7,0
Venezuela	380	1,1	580	2,0
Colômbia	310	0,9	500	1,0
Chile	250	0,7	370	1,0
Outros	600	2,0	350	1,0
Total	34.500	100,0	32.000	100

Tabela 3 - Vantagens e limitações da utilização de materiais plásticos em Engenharia [1, 3, 8]

VANTAGENS	LIMITAÇÕES
<p>Facilidade de Fabricação: Adaptam-se facilmente a produção em massa. Peças intrincadas são, muitas vezes, feitas mais facilmente em plástico. São mais fáceis de manusear. Processamento bom, com pouco trabalho e em tempo curto;</p> <p>Economia em Peso: Em geral, a densidade dos plásticos é bem menor do que a dos metais (1:7-1:8);</p> <p>Resistência a Corrosão e Abrasão: A maioria das peças de plástico são imunes a ferrugem, apodrecimento ou corrosão e muito resistentes aos produtos químicos e à umidade;</p> <p>Isolação Elétrica: Possuem, normalmente, baixa condutibilidade elétrica e boas características dielétricas;</p> <p>Isolação Térmica e Sonora: Possuem 10 vezes mais absorção de vibrações que o aço e cerca de 30 vezes menos condutibilidade térmica que o cobre;</p> <p>Baixa Permeabilidade a Vapor;</p> <p>Baixo Coeficiente de Atrito;</p> <p>Transparência;</p> <p>Características de Amortecimento: Em parte são resistentes a golpes e choques;</p> <p>Boas Características Superficiais: Superfícies lisas e uniformes, de fácil limpeza. Não é necessário pintura contra desgaste nem tratamento superficial posterior. Podem ter cores determinadas;</p> <p>Produção Rentável: Poucas operações para fabricar peças complexas. Pouco refugo com possível reaproveitamento. Fabricação rentável, especialmente na produção de grandes quantidades;</p> <p>Biodegradáveis: Característica dos plásticos mais modernos;</p>	<p>Baixa Resistência Mecânica: Normalmente não são muito resistentes, mesmo considerando-se sua baixa densidade;</p> <p>Instabilidade Dimensional: Empenam, racham e estão sujeitos a se deformarem por fluência. São, também, relativamente macios e riscáveis;</p> <p>Termicamente Instáveis: Queimam, e alguns, mesmo, o fazem com demasiada facilidade. A maioria dos plásticos possui temperatura de utilização abaixo de 100°C;</p> <p>Sujeitos a Deterioração: Deterioram-se ante a exposição ao ar ou à luz solar. Muitos são atacados por fungos, e alguns, até por ratos e camundongos;</p> <p>Odor: Alguns possuem odores definidos e, nem sempre agradáveis;</p> <p>Dificuldade de Reparação: Raramente podem ser consertadas;</p> <p>Custo: Os materiais plásticos não são baratos, principalmente se a peça for produzida em pequenos lotes;</p>

O desenvolvimento de novas técnicas na construção (projeto e fabricação) de ferramentas de injeção tem sido estimulado, principalmente, pelo surgimento de peças de plástico complexas e de alta qualidade. As fortes pressões para reduzir custos de

fabricação têm exigido também uma redução nos custos da ferramenta.

Estes fatores provocam o surgimento de grandes exigências no processo de avaliação da ferramenta e crescente responsabilidade na sua produção, resultando, desta forma, na utilização, cada vez mais intensa, de recursos de engenharia, projeto e fabricação auxiliados por computador, como o CAE - Computer Aided Engineering (Engenharia Assistida por Computador), o CAD - Computer Aided Design (Projeto Assistido por Computador) e o CAM - Computer Aided Manufacturing (Fabricação Assistida por Computador) [9, 10, 11].

O conjunto de procedimentos que visam prever, com a ajuda de um sistema computacional, o comportamento de peças em determinadas circunstâncias (por exemplo, o fluxo do plástico em uma cavidade, a refrigeração da peça, sua resposta à aplicação de forças) é designado por técnicas CAE [12].

Os aspectos técnicos e econômicos, considerados para a utilização ou não das tecnologias CAE/CAD/CAM na fabricação de moldes, são [13, 14]:

- redução dos tempos de produção;
- modernização;
- capacitação tecnológica;
- fabricação de moldes complexos e;
- aumento de qualidade.

A qualidade de um produto de plástico injetado está fundamentalmente associada ao material utilizado, ao processo de fabricação e a ferramenta utilizada para sua produção. Tal ferramenta, conhecida como molde, é produzida pelos fabricantes

de moldes que, hoje em dia, se dividem em: a) empresas artesanais, que utilizam somente equipamentos convencionais e normalmente são de pequeno porte; b) empresas que utilizam máquinas de comando numérico computadorizadas (CNC), gerenciadas através de uma estação de programação central; c) empresas que possuem sistemas CNC integrados a sistemas de projeto e engenharia assistidos por computador, os quais formam um verdadeiro sistema CAE/CAD/CAM [2, 15].

Os sistemas CAE, voltados à área de injeção de termoplásticos, se bem empregados, podem reduzir consideravelmente (e, até mesmo, eliminar) problemas que ocorrem durante o preenchimento de cavidades em moldes [11]. Através do estudo e interpretação prévia do fluxo do material, no interior da cavidade, os tempos de projeto e fabricação podem ser bastante reduzidos, permitindo assim uma produção mais estável.

Considerando o exposto, torna-se necessário avaliar os recursos disponíveis para a produção de peças de plástico, mostrando suas facilidades e limitações e procurando alternativas para aprimorá-los, de maneira que possam ser realmente úteis a este setor industrial, que se encontra entre aqueles que mais crescem, atualmente, no mundo inteiro [7].

1.1. Definição dos Objetivos

Consciente de que os problemas, que ocorrem na produção de peças de plástico, são consideráveis, tanto a nível de projeto quanto de fabricação da peça de plástico e da ferramenta de injeção, tem-se como objetivo maior deste trabalho, a introdução

de conceitos de simulação e a análise do comportamento do plástico quando escoando no interior da cavidade em um molde para injeção, através da apresentação de métodos específicos dentro de uma metodologia que deve ser aplicada, já na fase de concepção do produto e do molde, afim de prever e corrigir, antes do início da fabricação do molde, os possíveis problemas que podem ocorrer.

Assim sendo, os objetivos específicos que se pretende atingir com este trabalho são:

- a apresentação de um método manual de previsão do comportamento do material ao preencher uma cavidade, sem a necessidade do uso de equipamentos sofisticados e caros;
- a introdução da idéia de aplicação do computador na análise reológica*, como meio de obter dados mais confiáveis e em menor tempo;
- a proposição de uma metodologia para a análise do escoamento do material em cavidades e seus canais de alimentação, com o uso de recursos computacionais de simulação, afim de padronizar os procedimentos de avaliação de peças injetadas;
- a realização de testes de simulação, objetivando levantar e comparar resultados obtidos, a partir do estudo de um caso prático, com diferentes programas de simulação.

Desta forma, o trabalho apresenta, no capítulo 1, além dos objetivos, uma breve seção que descreve a situação do mercado mundial com relação à programas comerciais de simulação. O capítulo 2 apresenta a nomenclatura e os conceitos básicos

* Reologia é o nome dado à ciência que estuda a mecânica dos materiais deformáveis, abrangendo desde os materiais não completamente sólidos até os quase líquidos [31].

utilizados no setor de produção de peças de plástico. No capítulo 3 é descrito o procedimento utilizado na avaliação manual do escoamento do material. O capítulo 4 introduz a tecnologia de simulação por computador, descrevendo seus princípios básicos e formas de utilização. No capítulo 5 é proposta uma metodologia de análise reológica de peças em sistemas computacionais. O capítulo 6 relata o estudo de casos juntamente com uma análise comparativa entre dois sistemas de simulação do fluxo. Finalmente, no capítulo 7 são propostas algumas sugestões de continuidade do trabalho e apresentadas as conclusões.

1.2. Simulação e Análise do Preenchimento de Cavidades em Moldes para Injeção de Termoplásticos

Os plásticos são, quase sem exceção, conformáveis em estado fluido. As propriedades reológicas destes fluidos determinam a trabalhabilidade e têm considerável influência também nas propriedades da peça produzida [16].

O processo de fabricação de peças de plástico mais automatizável que existe é o de injeção, tornando possível a produção rentável de peças em grandes quantidades [8, 17, 18].

Para que se possa atingir baixos tempos de fabricação, no processo de injeção de plásticos, deve-se otimizar tanto a peça como o molde diretamente "no papel e não no aço", isto é, antes do início da fabricação da ferramenta de injeção.

Principalmente com o aumento da utilização do plástico nas peças técnicas, onde há uma elevada exigência de qualidade,

tornou-se freqüente a necessidade de alterações (correções) no molde, as quais traduzem-se em consumo elevado de tempo e aumento considerável do custo, até que a ferramenta seja liberada para a produção em série [16, 19, 20]. Este fato é ocasionado, geralmente, pela dificuldade de previsão do comportamento do plástico, no processo de injeção, durante as etapas de projeto da peça e do molde. Portanto, é necessária a utilização de uma ferramenta de apoio que permita a avaliação criteriosa da peça e do molde [16, 20, 21]. Os métodos de simulação do escoamento do material no interior de um molde visam cumprir esta função. Os métodos disponíveis no mercado baseiam-se:

a) na utilização de geometrias elementares, colocadas sobre a planificação manual da peça. A metodologia manual de representação do escoamento é conhecida como **método da imagem de enchimento** [22, 23] e fornece apenas uma avaliação qualitativa do processo. A representação do material escoando é feita por linhas isócronas, que simulam a posição, para um dado instante, em que o plástico se encontra dentro da cavidade. Estas linhas são denominadas de frentes de onda.

b) no cálculo do processo de enchimento, por programas de computador, fundamentados em métodos numéricos de resolução de equações [16]. Estes programas permitem avaliar numericamente o processo, durante a fase de preenchimento da ferramenta de injeção, e concluir sobre as propriedades resultantes na peça a ser produzida [21].

A aplicação do computador no projeto, através do CAD, e na fabricação, por meio do CAM e máquinas CNC, têm sido bastante

difundida quando comparada com o emprego de sistemas CAE para este setor. Isto deve-se ao fato de que a maioria dos fabricantes de moldes são empresas de pequeno e médio porte, além de, até pouco tempo atrás, os programas de simulação só estarem disponíveis para computadores de grande porte [2, 19].

A avaliação do processo de injeção na ferramenta pode ser dividida em 3 grandes áreas, como mostra a Figura 1 [20, 24]:

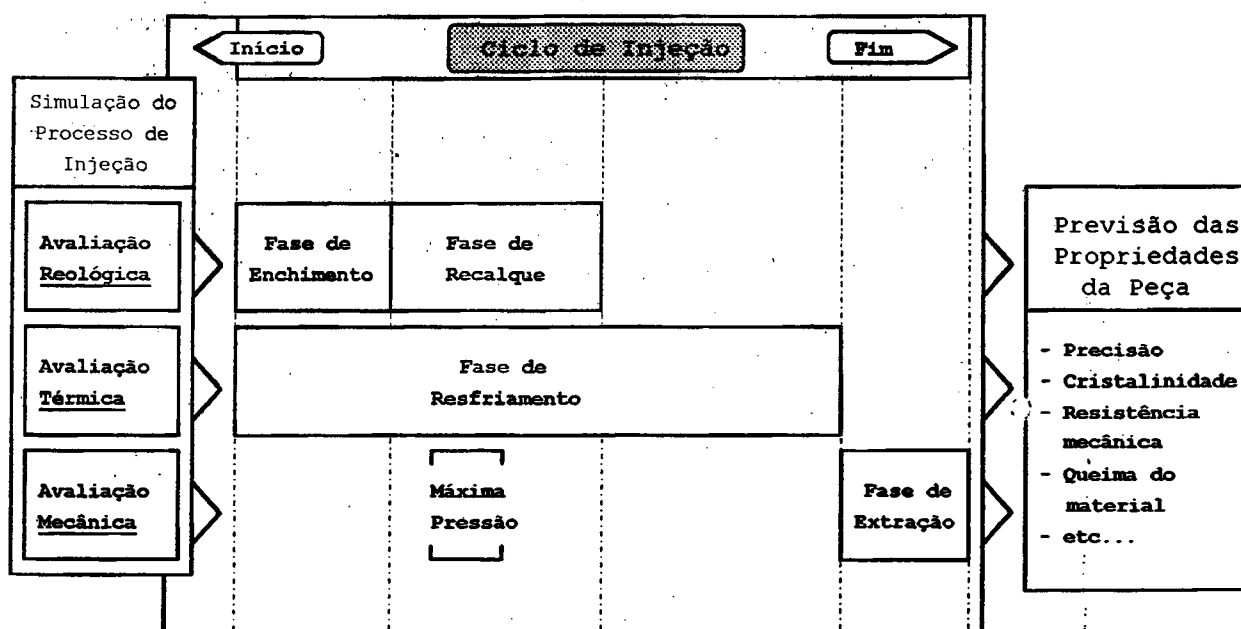


Figura 1 - Áreas de aplicação da simulação do processo de injeção de termoplásticos [20]

A avaliação reológica, que envolve o processo de simular o escoamento do material no interior da zona moldante (ou cavidade) e através do sistema de alimentação, analisa o comportamento do material durante a fase de enchimento e de recalque. O resultado desta análise é a representação gráfica do fluxo do material e dos valores quantitativos sobre o processo de injeção.

A avaliação térmica fornece elementos para se conseguir um resfriamento homogêneo e rápido do material, sem comprometer a peça final. Neste processo são definidas posição e forma dos canais de refrigeração, o fluido refrigerante a ser utilizado, além de outros componentes e parâmetros do sistema de refrigeração.

Com a avaliação mecânica pretende-se obter o melhor dimensionamento possível dos componentes da ferramenta de injeção, de forma que, tanto as medidas quanto as deformações do molde não ultrapassem os valores admissíveis, mantendo a peça final injetada dentro das tolerâncias previstas no projeto.

Desde o desenvolvimento dos primeiros módulos de programas, nos anos 70, até hoje, os sistemas de simulação tem sido aperfeiçoados, apresentando, cada vez mais, resultados confiáveis [20, 25]. A oferta também cresceu, sendo que a Tabela 4 apresenta uma visão geral de alguns sistemas computacionais atualmente disponíveis para aplicação em termoplásticos. Normalmente, os programas são modulares, de forma que o usuário pode adquirir apenas os módulos que lhe interessam.

O tempo que decorre desde o início da injeção de um material termoplástico até o completo preenchimento volumétrico (fase de enchimento e recalque) de uma cavidade, absorve apenas uma pequena parcela do tempo total do ciclo de injeção (ver Figura 1). Este valor fica na ordem de 1/10 do tempo de ciclo [16, 26]. Os programas de simulação abrangem, fundamentalmente, esta etapa do ciclo. Com isto pode-se garantir que, se uma peça apresentar problema de preenchimento na simulação, certamente ela não será produzida convenientemente na máquina de injeção.

Tabela 4 - Alguns programas de simulação disponíveis no mercado mundial [20, 27]

Programa	Fornecedor	Análise Reológica	Análise Térmica	Análise Mecânica	Outros Módulos
Cadmould	Simcon	C2D C3D-Mefisto C3D-Mestro C3D-Mehold	C2D C3D-Mecool	C2D C3D-Meclamp	
C-Mold	CCMP	C-Flow C-Pack	C-Cool		
Femould	Hahn&Kolb	C2D C3D-Mefisto C3D-Mestro C3D-Mehold	C2D	MEF C2D C3D-Meclamp	
I-Deas Plastics	SDRC	Polyfill I-DEAS Mold Filling	Polycool I-DEAS Mold Cooling	Supertab Model Solution Optimization	Warp Shrink Weld Locator
Moldflow	Moldflow	MF-2D MFL4-3D MFLP-3D	MF-Cool	Fenas Moldmech	MF-Warp MF-Gas
PC-Mold	KIMW	PCFlow	PC-Therm	PC-Mech	
TMConcept	Plastics & Computers	TMC-FA TMCFABest	TMC-MTA		TMC-MCO TMC-CSE PP SAS
Simuflow	C-Tech	Simuflow-2D Simuflow-3D	Simucool		Optimold
Strim 100 Plastic	Cisigraph	Procop 2D-Rheolo 3D-Rheolo	Cooling Analysis	Plastic Struktur Analyse	3D- Modelling

Todavia, se for atingida uma situação otimizada na simulação do processo, não se pode garantir que a peça a ser produzida, na prática, estará livre de defeitos. Os fenômenos (contração, resfriamento) que ocorrem nas fases seguintes do ciclo de

injeção tem grande influência na qualidade da peça final. Alguns destes fenômenos ainda não são considerados por todos os programas atualmente disponíveis no mercado.

O restante do ciclo de injeção é dividido nas fases a seguir expostas:

- fase de recalque: onde acontece a contração volumétrica do material, que deve ser compensada pelo material que ainda flui no sistema de alimentação. Maiores detalhes são encontrados no item 2.4.2.
- fase de resfriamento: na qual o sistema de alimentação e o ponto de injeção solidificam e a peça resfria até que seja possível sua extração;
- fase de extração: onde a máquina executa os movimentos de abertura do molde, extração da peça e fechamento do molde [16].

Alguns programas oferecem módulos para avaliação da contração, do empenamento e da fase de refrigeração do molde [12, 19, 26, 28, 29, 30].

C A P Í T U L O 2

2. NOÇÕES BÁSICAS PARA A PRODUÇÃO DE PEÇAS DE PLÁSTICO PELO PROCESSO DE INJEÇÃO

Com o objetivo de fornecer um embasamento teórico sobre o processo de criação e produção de uma peça em plástico, são apresentados, a seguir, os conceitos sobre os materiais plásticos, bem como, a sequência de procedimentos e processos necessários para a fabricação de produtos em plástico.

2.1. O Material: Plástico

Os plásticos são materiais artificiais, geralmente de origem orgânica sintética, que, em algum estágio de sua fabricação, adquiriram condição plástica, durante a qual foram moldados, geralmente com a ajuda de calor e pressão e, muitas vezes, com o emprego de moldes. São artificiais porque resultam de misturas e reações, sendo, por isso, distintos dos materiais de ocorrência natural (como madeira, areia ou minérios) que se encontram de forma livre na natureza. Materiais de origem orgânica sintética resultam ainda de processos químicos e de sínteses, a partir de matérias primas orgânicas simples [1, 3, 4, 31].

O componente básico dos materiais plásticos é uma resina, ou blenda, um material que pode, sob condições definidas, amolecer e escoar, adquirindo características de moldabilidade, e que é elaborada por processos de síntese química, conhecidos

como reações de polimerização, a partir de um produto químico simples, denominado monômero [1].

Os plásticos podem ser, de acordo com seu comportamento à moldagem, classificados em duas grandes categorias: termoplásticos e termoestáveis [1, 3, 4, 8, 32, 33, 34].

Os termoplásticos (ou plastômeros), podem ser endurecidos ou amolecidos reversivelmente. Apresentam longas cadeias moleculares, não ocorrendo alteração química durante este processo. Além disso, conforme o seu tipo, são quebradiços e tenaz-elásticos a temperatura ambiente.

Os termoestáveis (ou termofixos, ou ainda termoduros) não apresentam esta característica, ou seja, uma vez ocorrida a cura, o material endurece e não pode mais ser remoldado. Apresentam encadeamento comprimido de moléculas. Decompõem-se ante superaquecimento, sem amolecimento. A temperatura ambiente são quebradiços e duros.

A classificação dos plásticos com relação a sua organização estrutural é dividida em: amorfos e cristalinos (ou semi-cristalinos). Os materiais amorfos são os que têm as macromoléculas encadeadas desordenadamente. Já os cristalinos são os termoplásticos, onde as macromoléculas estão tão próximas em alguns pontos, que se ordenam em cristais (cristalitos) [1, 8, 35].

Os plásticos tem condições de atender, de uma maneira eficaz e econômica, os mais diversos requisitos funcionais, porém sua utilização requer um conhecimento minucioso de sua natureza, comportamento, possibilidades e limitações [1].

A Tabela 5 mostra uma relação dos plásticos mais utilizados na atualidade com suas respectivas siglas.

Tabela 5 - Abreviações dos plásticos - DIN 7728 [8, 31]

ABS	Copolímeros de acrilonitrilo-butadieno-estireno
CA	Acetato de celulose
CAB	Acetobutirato de celulose (Acetato butirato de celulose)
CAP	Acetopropionato de celulose (Acetato propinato de celulose)
CP	Propinato de celulose
EP	Epóxi
MF	Formaldeído de melamina (Melanina formaldeído)
PA	Poliamida
PA6	Poliamida polímero de E-caprolactame
PA66	Poliamida polímero de hexametilendiamina e do ácido adipico
PBTP	Polibutilentereftalato
PC	Policarbonato
PCTFE	Policlorotrifluoretileno
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno alta densidade (HDPE)
PEBD	Polietileno baixa densidade (LDPE)
PETP	Polietilenotereftalato
PMMA	Polimetilmetacrilato
POM	Polioximetileno, Poliформaldeído
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PTFE	Politetrafluoretileno
PUR	Poliuretano
PVC	Cloreto de polivinila
SAN	Copolímeros de estireno-acrilonitrilo
SB	Copolímeros de estireno-butadieno
UF	Formaldeído uréico
UP	Poliéster não saturado

2.2. Projeto da Peça de Plástico

A sequência lógica de criação de uma peça de plástico passa por 3 fases distintas, quais sejam: o projeto da peça, a produção do molde e a moldagem final da peça. Na primeira fase, as etapas de concepção da idéia e modelamento da peça definirão as características finais do produto.

2.2.1. Concepção da Idéia

Esta etapa deve ser realizada com critério e experiência. De um lado tem-se a multiplicidade de materiais, com propriedades muitas vezes díspares, a considerar. De outro, tem-se as novas possibilidades que a substituição de outros materiais (aço, madeira, etc.) traz, no que concerne a aspectos de forma e de estética. Entre ambas tem-se o problema de produzir uma ferramenta que viabilize a moldagem da peça idealizada, com o material selecionado, em condições tecnicamente corretas e economicamente aceitáveis.

É importante que participem, nesta etapa, o projetista do produto, o especialista em fabricação de peças de plástico e o especialista em materiais, além do cliente [1, 17].

Nesta etapa devem ser definidos: forma, funções, dimensões, material da peça e da ferramenta e processo de moldagem. Em [36, 37, 38, 39] estão apresentadas maiores informações sobre os materiais e tratamentos térmicos usados na fabricação de moldes.

2.2.2. Modelamento da Peça

Para uma melhor avaliação da peça projetada, é necessária, muitas vezes, a confecção de um modelo ou protótipo. Vários são os processos existentes para este fim, entre eles, a criação manual do modelo em gesso, madeira, poliuretano, e outros. Por outro lado, as novas tecnologias existentes permitem a introdução do conceito de prototipagem rápida. Um exemplo é a Tecnologia de Fabricação por Camadas (LMT - Layer Manufacturing Technology), que tem por objetivo a produção de modelos em tempo extremamente reduzido quando comparado com as tecnologias convencionais [40].

Dentro da tecnologia LMT, destaca-se a aplicação do processo de Stereolitografia a Laser na produção de modelos para a área de produtos injetados.

A Stereolitografia permite fabricar modelos tridimensionais de peças com geometrias que podem assumir formas extremamente complexas. A partir do desenho da peça em um sistema CAD, é possível obter, em poucas horas, protótipos em escala ou em tamanho natural, verificar a sua forma e conferir a funcionalidade. Além disso, permite proceder a estudos de montagem, de embalagem, sem necessidade de criar previamente o molde para produção da peça final [40, 41, 42].

2.3. Produção do Molde

Na produção do molde estão envolvidas duas grandes etapas, ou seja, o projeto e a fabricação do molde. A seguir será apresentada uma rápida descrição de cada uma destas etapas.

2.3.1. Etapa de Projeto

O projeto de um molde de injeção deve ser feito tendo em vista as características da máquina, do material a moldar e da peça pretendida. Devem ser levados em consideração, entre outros, os seguintes aspectos [1, 38, 43]:

- peso do material por injeção;
- ciclo de moldagem;
- força de fechamento;
- sistema de alimentação;
- tipos de ponto de injeção;
- aquecimento do material;
- resfriamento do molde;
- quantidade e disposição das cavidades;
- contração do material;
- máquina a ser utilizada (fixação do molde, espaçamento entre colunas, curso de abertura);
- aspectos estéticos (marcas de injeção, de rechupe, de extratores, etc.);
- escoamento do material durante a injeção (linhas de solda e aprisionamento de ar);
- resistência da ferramenta de injeção e;
- flexibilidade de manutenção.

Considerando que em torno de 70% dos custos de construção de um molde são de responsabilidade da área de projeto, as decisões devem ser extremamente racionais e planejadas [44].

Em [17, 45, 46, 47, 48, 49, 50] são apresentadas

sistemáticas e regras práticas para a realização de um projeto coerente da ferramenta de injeção.

O uso de programas de computador, para auxílio ao projeto, tem sido difundido, no setor de moldes de injeção, como forma de contornar os problemas emergentes com a grande concorrência no setor e com o crescimento das exigências de qualidade e prazos [9, 51]. A oferta destes programas, para o setor de plásticos, é bastante grande. Alguns são específicos para este fim, como, por exemplo, o SerMold [52, 53]. A grande maioria dos usuários utiliza programas genéricos, com módulos opcionais voltados para o projeto e fabricação de moldes de injeção. Nestes incluem-se alguns sistemas integrados CAE/CAD/CAM, isto é, sistemas que permitem tanto o projeto do produto e do molde quanto a usinagem de modelos e cavidades, como, por exemplo, o Graftek, o DUCT, o Intergraph I/Mold, o Euclid-IS e o Strim 100 [54, 55, 56, 57, 58]. Ainda podem ser citados programas como o AutoCad, o CadKey, o Genius-Mold e o Microstation, que possuem apenas características de projeto, mas que têm interface com o programa SmartCAM, gerador de instruções para máquinas de comando numérico [59, 60, 61, 62, 63].

As vantagens do projeto assistido por computador não aparecem apenas na fase de projeto, mas também nas operações posteriores. Somente com o auxílio do computador é possível gerar os dados necessários para alimentar as modernas máquinas operatrizes controladas numericamente. O tempo de retrabalho para ajustes, na montagem das diferentes peças do molde, fica bastante reduzido, devido a grande reprodutibilidade dos contornos e pela manutenção de tolerâncias apertadas. A

possibilidade de armazenamento das soluções de situações críticas ou de peças repetitivas é mais uma das vantagens do projeto assistido por computador [64, 65, 66].

A Figura 2 mostra a interrelação entre as diversas etapas do projeto e fabricação de moldes de injeção.

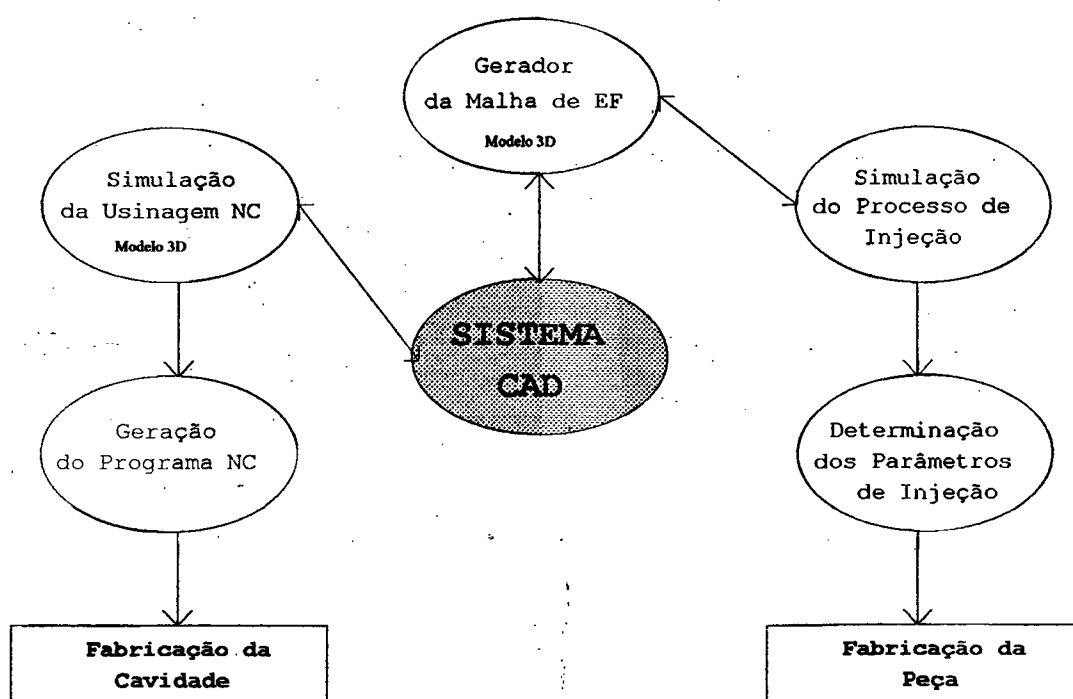


Figura 2 - Interrelação entre as etapas de projeto e fabricação de moldes [67]

A utilização de acessórios padrão (standards), como placas, guias, extratores, também é uma técnica saudável, uma vez que facilitam a reposição de partes danificadas do molde a um custo mais baixo. Há, no mercado mundial, um grande número de fornecedores de acessórios para moldes de injeção. Entre eles podem ser citados a HASCO/Alemanha, RABOURDIN/França, MOLDEBASE/Portugal, POLIMOLD/Brasil, DME/Estados Unidos da América, IBERONORMA/Portugal, DMS/Estados Unidos da América,

STRACK-NORMA/Alemanha, EOC/Alemanha, STEINEL/Alemanha, NATIONAL STANDARD MOLD SETS AND ACCESSORIES/Estados Unidos da América, EUROTOOL/Holanda, entre outros, que possuem catálogos com as informações e dados sobre toda a linha de componentes disponíveis [46, 47, 68, 69, 70].

O emprego de standards também fica bastante facilitado com o interfaceamento entre os sistemas CAD e os bancos de dados destes padrões. O tempo de geração de uma ferramenta é consideravelmente reduzido, além da vantagem da geração automática da lista de peças, que serve ao mesmo tempo como documento de encomenda dos standards [65]. Por exemplo, a Polimold, empresa brasileira, fornece o catálogo eletrônico Polimold para microcomputadores da linha PC [71]. Existem ainda versões computadorizadas, dos grandes fornecedores, para sistemas CAD/CAM de computadores de grande porte, como a biblioteca DME para o programa DUCT5 ou a Hasco para o pacote da Intergraph [56].

A análise reológica, que deve ser executada durante a fase de projeto do molde, fornece dados sobre a pressão de enchimento necessária, mas também dados sobre os parâmetros ideais de temperatura da massa e da ferramenta, força de fechamento e velocidade de injeção. Estes dados servem como referência para a regulação da máquina de injeção. Além disso, são fornecidos ainda os valores de tempo de resfriamento ou de extração da peça, percentual de camadas solidificadas, orientação do fluxo e tensões na peça. Para peças simples pode-se prever, com relativa facilidade, o comportamento do escoamento do material na cavidade. Em peças complicadas, surgem várias dúvidas a serem

esclarecidas, as quais influenciam consideravelmente a qualidade do produto final. Estas dúvidas podem ser respondidas por programas de simulação reológica baseados em elementos finitos. Através da variação na posição de injeção e dimensionamento do canal de distribuição, o comportamento da massa fundida, a distribuição de temperatura e as necessidades de pressão podem ser otimizadas. Aqui torna-se claro o quão importante é o trabalho conjunto entre o departamento de projeto e o setor de construção da ferramenta [72].

A avaliação reológica é o tema principal do trabalho e será abordada mais detalhadamente nos próximos capítulos.

Um molde é composto de várias partes. A Figura 3 mostra o esquema de um molde típico para injeção de termoplásticos com sua respectiva nomenclatura.

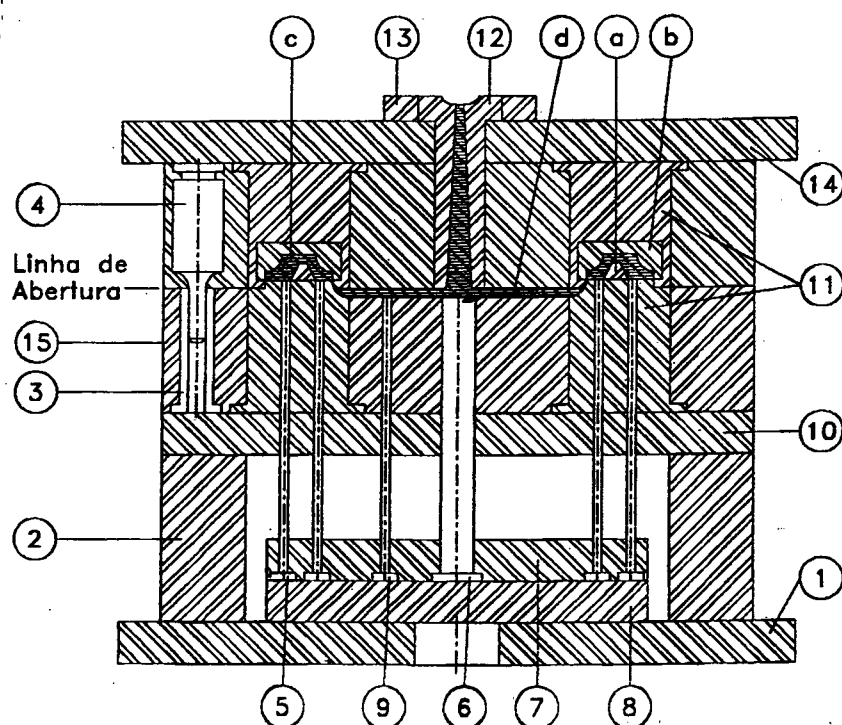


Figura 3 - Representação em corte de um molde típico para injeção de termoplásticos [4]

A nomenclatura mais usual adotada pelos fabricantes de moldes está relacionada a seguir:

- 1) Placa de fixação inferior
- 2) Coluna ou espaçador
- 3) Bucha-guia
- 4) Coluna-guia
- 5) Pino extrator
- 6) Extrator do canal
- 7) Placa porta-extratores
- 8) Placa impulsora
- 9) Pino de retorno
- 10) Placa-suporte
- 11) Postiços ou insertos
 - a) macho
 - b) fêmea
- 12) Bucha de injeção
- 13) Anel de centragem
- 14) Placa de fixação superior
- 15) Placa de montagem dos postiços superior e inferior
 - c) cavidade ou zona moldante
 - d) canal de distribuição, jito ou canal de alimentação

Existem divergências ou duplicidade para alguns termos. Por exemplo, o molde (conjunto que contém todos os componentes) também é tratado em certas regiões como matriz ou ferramenta de injeção e a linha de abertura do molde também é conhecida como linha de junta [1, 3, 4, 8, 36, 68].

A Figura 4 mostra esquematicamente a posição de um ponto de injeção em uma cavidade.

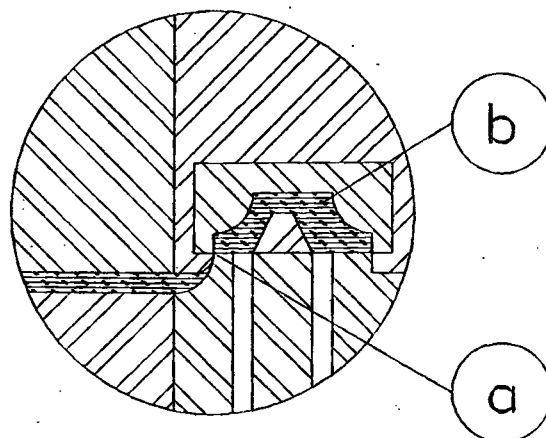


Figura 4 - Detalhe de uma cavidade

O ponto de injeção, também denominado ponto de entrada ou "gate", é representado na figura por **a** e a cavidade, que é o espaço a ser preenchido pelo material, por **b**.

2.3.2. Etapa de Fabricação

A utilização de um bom sistema de planejamento da produção, antes do início da usinagem propriamente dita, pode facilitar enormemente a etapa seguinte de fabricação, no momento em que permite responder a uma série de perguntas, tais como:

- a peça já foi fabricada?
- em caso afirmativo, qual a máquina utilizada?
- quais as experiências anteriores?
- peso e dimensões da peça (para dimensionamento do cilindro de plastificação e força de fechamento)?
- onde está armazenado o molde?
- dispositivos de fixação necessários?
- a partir de quando a máquina está livre?

- que tipo de cilindro de plastificação é necessário para este trabalho?
- onde o material está estocado?
- há necessidade de pré-secagem do material? [8].

O emprego de sistemas de planejamento auxiliado por computador (CAPP) é de grande valia na organização da produção para as empresas do setor de moldes. Em Portugal foi registrada uma melhora dos prazos de entrega nas empresas que utilizam sistemas de planejamento do processo informatizados [73].

Para a fabricação de moldes complexos, a necessidade de postigos é muito grande. Normalmente os postigos são peças que possuem geometrias não simétricas, com muitas ranhuras e/ou não facilmente definidas. Desta forma, estas peças são trabalhadas fora do molde e, posteriormente, neste encaixadas. As máquinas de eletroerosão prestam-se muito bem para tais trabalhos. Para tanto necessitam de eletrodos com a forma da cavidade a ser trabalhada. Os eletrodos, de cobre ou grafite, são, geralmente, usinados pelas máquinas de comando numérico, como forma de se obter uma boa qualidade dimensional.

2.4. Processo de Injeção

Os processos de produção de um produto plástico podem ser: moldagem por compressão, transferência, composição (plásticos reforçados), injeção, extrusão, sopro e termoformação. Os plásticos podem ainda ser colados e soldados (termoplásticos) [1, 17].

O escopo deste trabalho envolve o estudo reológico dos termoplásticos ante o processo de injeção, sendo portanto, o processo ao qual será dada maior ênfase. Em [74, 75] podem ser encontradas maiores informações sobre outros processos de conformação de plásticos.

O processo de injeção caracteriza-se por uma termoformação prévia de plásticos, que nos termoplásticos se dá através de um amolecimento e plastificação do material (granulado), por admissão de energia, injeção em um molde e, após, retirada de calor. Nos termofixos e elastômeros é a introdução de uma massa plástica e após, endurecimento (cura) ou vulcanização em um molde (por admissão de calor) [8].

Na moldagem de termoplásticos torna-se necessário aquecer o material a um estado de fluidez, conformá-lo na cavidade de um molde, para então resfriá-lo enquanto ainda estiver contido no molde. A moldagem por injeção consiste em forçar uma carga de material plástico aquecido, por meio de um êmbolo, em uma prensa-cilindro aquecida, através de um bocal, até um molde frio ou pouco aquecido, no qual o material preenche as cavidades ali alojadas. O material frio, granulado ou em pó, é alimentado no cilindro, sendo então aquecido até amolecer, ou "**plastificar**", para então ser forçado sob pressão, ou "**injetado**", na cavidade, de onde é posteriormente extraído [76].

A injeção é um processo de fabricação que exige elevados investimentos em máquinas e moldes e, por isso, rentável apenas para produção de peças em grandes quantidades [8].

Uma boa peça injetada só pode ser conseguida com a combinação correta de máquina, molde e material. O processo de

injeção pode ser influenciado por vários fatores. A combinação de material, molde e máquina resulta de um grande número de variáveis que se deve levar em conta em cada produção [8].

Para que se obtenha peças com qualidade, a temperatura correta do molde é tão importante quanto a regulagem da máquina. O objetivo é regular a temperatura de forma que cada zona de cada peça esfrie ao mesmo tempo que as demais. Toda peça deve solidificar-se em direção ao canal de entrada, afim de que a pressão de recalque possa compensar a contração até sua última fase [3, 8].

2.4.1. Parâmetros de Injeção

Para que haja um melhor entendimento dos termos utilizados durante a apresentação do trabalho, convém que estes sejam definidos de uma forma explícita. Os parâmetros mais comumente empregados, segundo [1, 3, 4], são:

- a) *Temperatura de injeção (T_i)* - também denominada de temperatura de moldagem, temperatura da massa fundida ou temperatura do material. Representa a temperatura, dada em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$), na qual o material a ser injetado deve estar quando do início do processo de injeção.
- b) *Temperatura do molde (T_m)* - é a temperatura, dada em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$), na qual as paredes da cavidade devem estar no instante da injeção.
- c) *Tempo de injeção (t_i)* - é o intervalo de tempo entre o instante em que o cilindro avança e o momento em que a pressão de injeção pára de atuar. É dado em segundos (s).

- d) *Velocidade de injeção* (v_i) - é a velocidade com que o máquina de injeção introduz o material no molde. É dada em (cm/s). Geralmente, a velocidade inicial é de 3 cm/s, caindo para 0,1 cm/s quando as cavidades estiverem cheias.
- e) *Pressão de injeção* (P_i) - é a pressão que a máquina injetora exerce sobre o material, durante o processo de injeção. É dado em (bar) ou (kg/cm^2). Normalmente situa-se na faixa de 1.400 kg/cm^2 ou abaixo.
- f) *Força de fechamento* (F_f) - é a força que deve resistir a pressão de injeção para manter o molde fechado. É dada em toneladas (ton) e controla a máxima área de moldagem projetada que pode ser produzida.
- g) *Capacidade de injeção* (C_i) - especifica o peso máximo de material que pode ser moldado a cada injeção. O peso é dado em gramas (g) de poliestireno, sendo que, para materiais diferentes, deve ser calculada a correção.
- h) *Capacidade de plastificação* (C_p) - é expressa pelo número de quilogramas de material que a máquina injetora pode elevar, por hora (kg/h), à temperatura de moldagem. O material padrão é o poliestireno. Para outros materiais deve ser procedida a correção.
- i) *Ciclo de injeção* (t_c) - é o intervalo de tempo total entre o instante em que o molde se fecha, durante um ciclo, e o instante correspondente, em que ele se fecha, no ciclo seguinte. É representado por n e sua unidade é ciclos por hora (ciclos/h). O ciclo de injeção de uma peça divide-se

em duas fases, quais sejam, a fase de injeção e a fase de recalque.

2.4.2. Ciclo de Injeção

O ciclo de operações na moldagem por injeção compreende as seguintes etapas [1]:

- a) fechamento do molde;
- b) injeção do material pelo movimento de avanço do êmbolo;
- c) manutenção de pressão, pelo êmbolo, por um período de tempo determinado;
- d) retorno do êmbolo;
- e) abertura do molde para extração da peça.

A Figura 5 representa a seqüência de operações num ciclo de injeção.

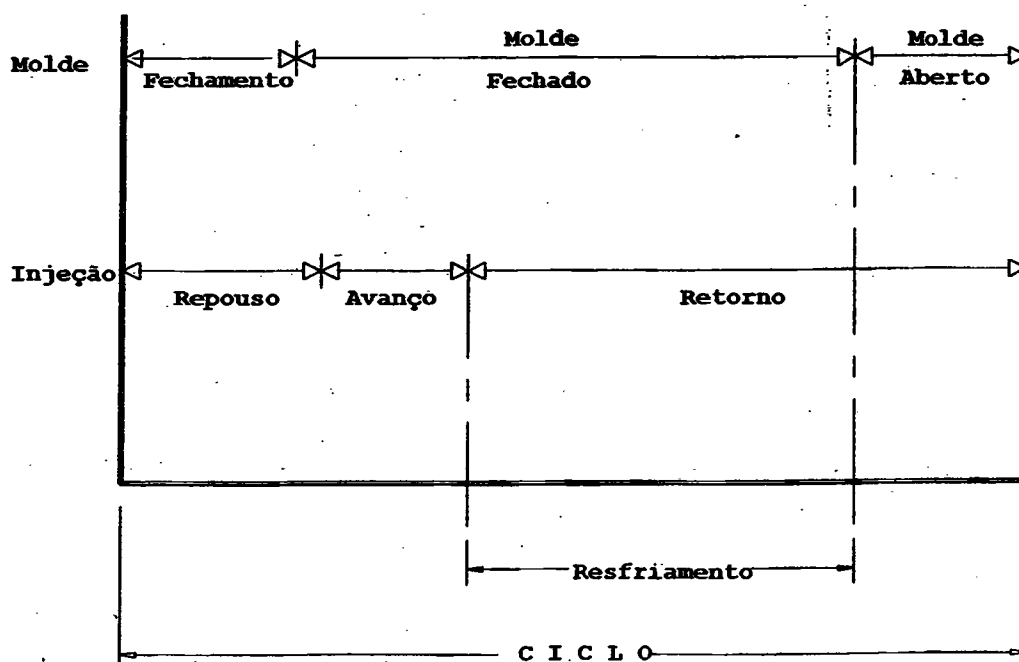


Figura 5 - Seqüência de operações num ciclo de moldagem por injeção [1]

Durante o tempo em que a máquina injetora está "empurrando" material para o interior da cavidade, o processo é dividido em duas fases distintas: a fase de injeção e a fase de recalque.

Fase de injeção ou enchimento: quando o êmbolo, ou cilindro de injeção, avança, inicialmente ele se move com velocidade constante, até que a cavidade esteja completamente preenchida. As Figuras 6 e 7.a mostram esquematicamente esta fase.

Fase de recalque: esta fase é ainda dividida em duas sub-fases distintas, quais sejam:

Fase de pressurização: com a cavidade já preenchida, o êmbolo se move lentamente, submetendo o molde a uma pressão de recalque. Nesta fase o plástico, por ser extremamente compressível, é compactado. Por volta de 15% a mais de material é forçado para o interior da cavidade. Esta fase está representada nas Figuras 6 e 7.b.

Fase de compensação: nesta fase o êmbolo continua a avançar vagarosamente, para compensar a contração volumétrica do plástico, que pode variar aproximadamente em 25% do estado plástico para o sólido. As Figuras 6 e 7.c apresentam esquematicamente este fenômeno.

2.4.3. Comportamento do Plástico durante o Escoamento

A forma como o material plástico escoar, no interior dos canais de alimentação e na cavidade, gera uma série de fenômenos que devem ser conhecidos para possibilitar a análise posterior do fluxo. As tensões resultantes do processo de injeção são de

fundamental importância para a avaliação da qualidade do produto final. Dois termos distintos, que por vezes são confundidos, são largamente empregados quando do estudo reológico:

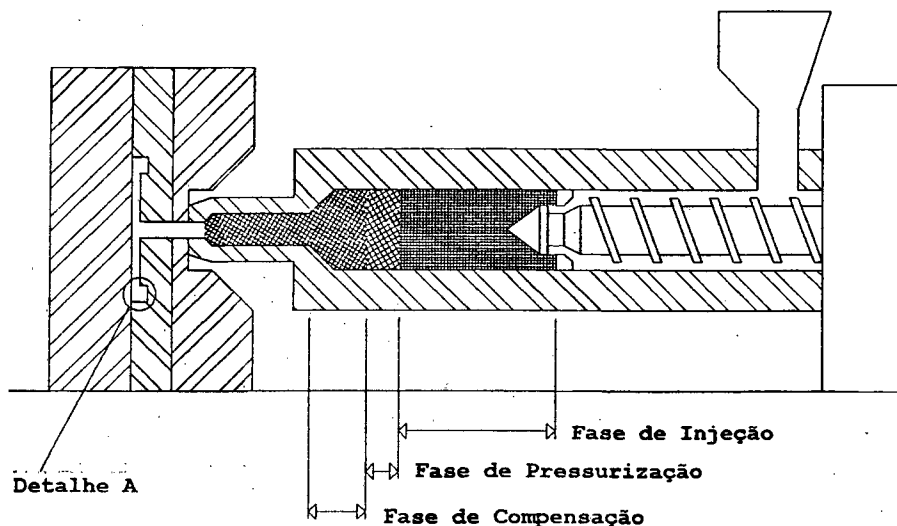


Figura 6 - Esquema de uma máquina injetora e as fases de injeção [77]

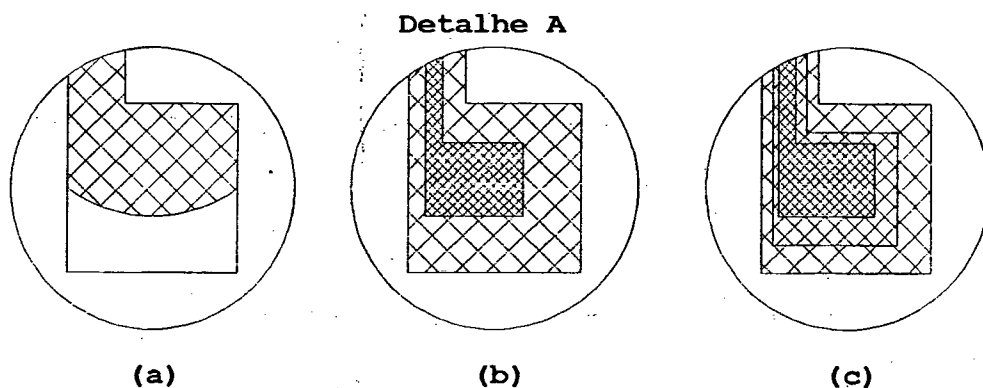


Figura 7 - Etapas do preenchimento da cavidade: a) injeção; b) pressurização; c) compensação [77]

Tensão de cisalhamento ("shear stress"): é puramente uma relação entre força e área. Surge quando o material escóia e é friccionado contra a parede da cavidade. Esta tensão orientará as moléculas do material na direção principal do

fluxo. A tensão de cisalhamento terá seu valor máximo na parede da cavidade e o seu mínimo (igual a zero) no centro do fluxo.

Taxa de cisalhamento ("shear rate"): é um valor que representa a quantidade de plástico deslizando sobre a camada adjacente. A taxa de cisalhamento é igual a zero na parede da cavidade, onde o material está solidificado, cresce a um valor máximo, exatamente onde o material tem sua zona de transição entre sólido e plástico, e decresce novamente para zero no centro do fluxo.

A forma geométrica da cavidade pode também ocasionar o aparecimento de alguns problemas para a qualidade da peça final. A seguir serão expostos os efeitos mais importantes a serem considerados na avaliação de uma ferramenta de injeção [3, 4, 38, 48, 49, 77].

Linha de solda ("weld line"): uma linha de solda é formada quando duas frentes de fluxo (frentes de onda) se encontram. Além da aparência visual ser, por vezes, inaceitável, a linha de solda causa enfraquecimento mecânico da peça pois ela age como concentradora de tensões. A Figura 8 representa a formação da linha de solda.

Linha de junta ("meld line"): é similar a linha de solda, diferindo apenas na forma de encontro dos fluxos. Enquanto que na linha de solda os fluxos se encontram frontalmente, na linha de junta eles se tocam paralelamente. Geralmente tem conseqüências menos críticas que as linhas de solda. Uma linha de junta é apresentada na Figura 9.

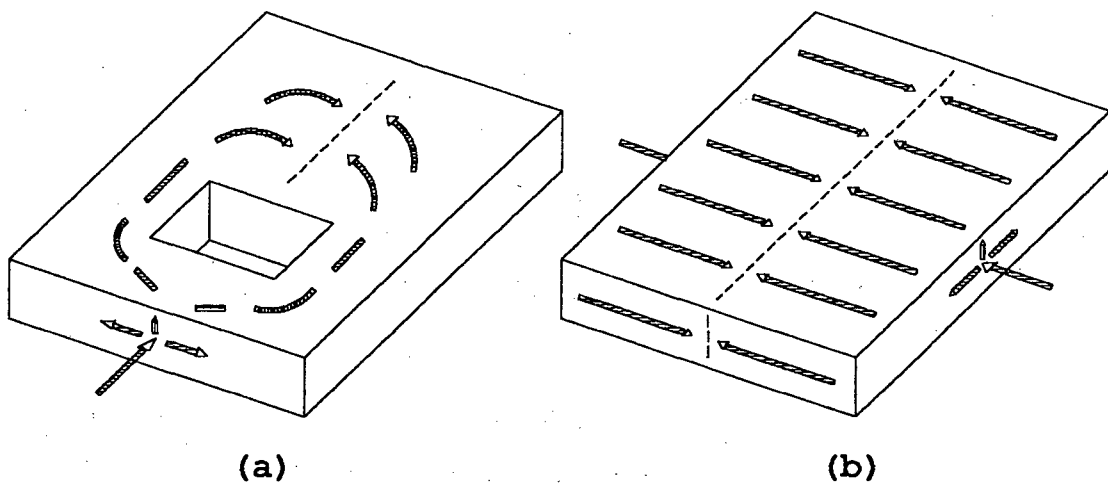


Figura 8 - Linha de solda formada por: a) fluxo desviado e posteriormente reencontrado; b) fluxo procedente de dois pontos de injeção

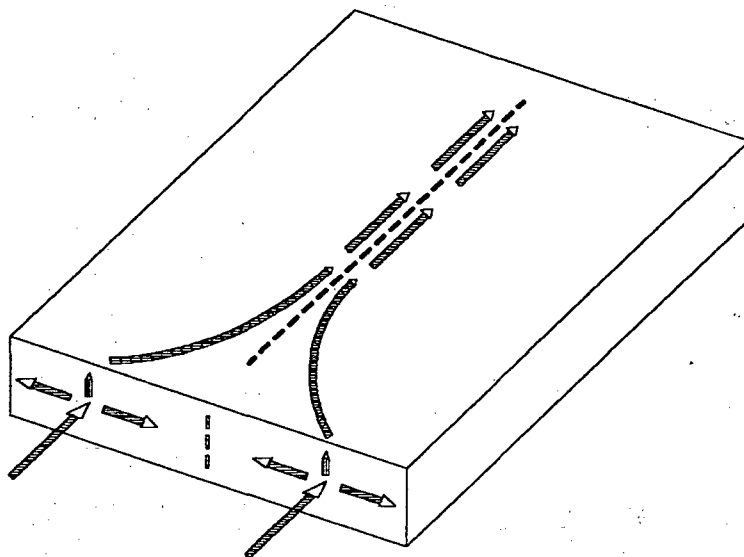


Figura 9 - Linha de junta formada por escoamento a partir de dois pontos de injeção

Efeito de hesitação ("hesitation"): este efeito ocorre quando o material, penetrando na cavidade, encontra uma seção de parede com espessura muito fina. A pressão de injeção não é suficiente para empurrar o material por esta seção e este

flui então pelas seções mais espessas. Enquanto a cavidade vai sendo preenchida, o plástico na seção fina resfria. Quando a cavidade estiver quase preenchida, a pressão de injeção total ficará disponível para preencher a seção fina, mas, com o material já solidificado, esta área não será completada. A Figura 10 mostra um esquema do efeito de hesitação.

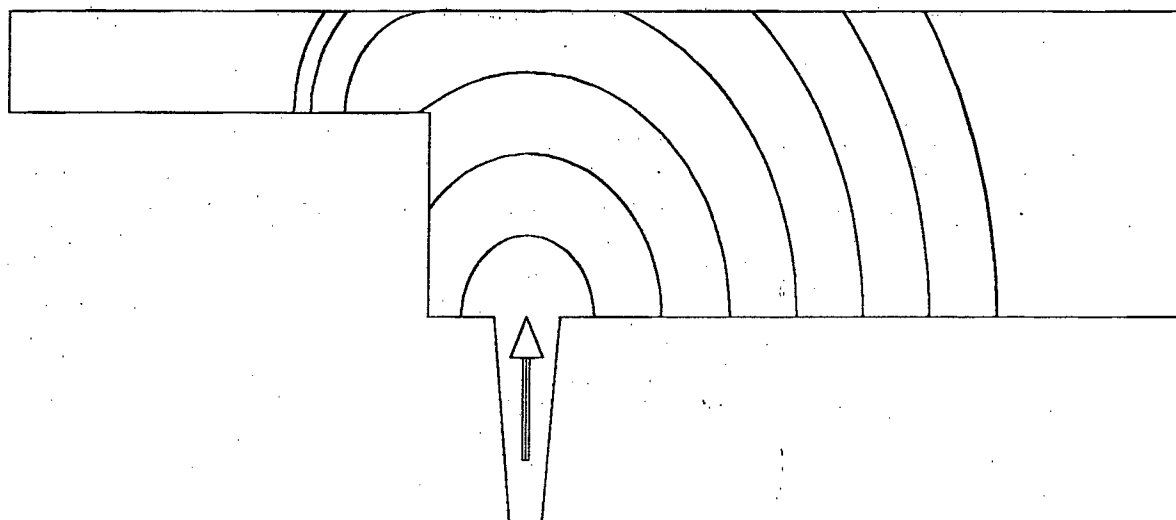


Figura 10 - Efeito de hesitação [77]

Efeito de empacotamento ("overpack"): o material, ao escoar, sempre preenche primeiramente o caminho de fluxo mais fácil. A principal causa do efeito de empacotamento é o fluxo desbalanceado. Como os plásticos são altamente compressíveis, quando há regiões muito mais fáceis de preencher que outras, estas serão primeiramente completadas e começarão a ser compactadas enquanto as regiões mais difíceis forem sendo preenchidas. O empacotamento é uma das causas mais comuns de empenamento de peças. Maiores detalhes serão apresentados no item 5.9.

Efeito de refluxo ("underflow"): a Figura 11 mostra esquematicamente o efeito de refluxo. Os fluxos dos dois pontos de injeção laterais encontram o fluxo do ponto de injeção central e param. Quando o fluxo pára, a camada solidificada cresce em espessura e logo após, torna-se novamente plástica devido ao calor de atrito, fazendo com que o material escoe na direção oposta. Este fluxo reverso, ou refluxo, ocasiona a produção de peças de baixa qualidade, tanto na aparência superficial quanto nas qualidades mecânicas.

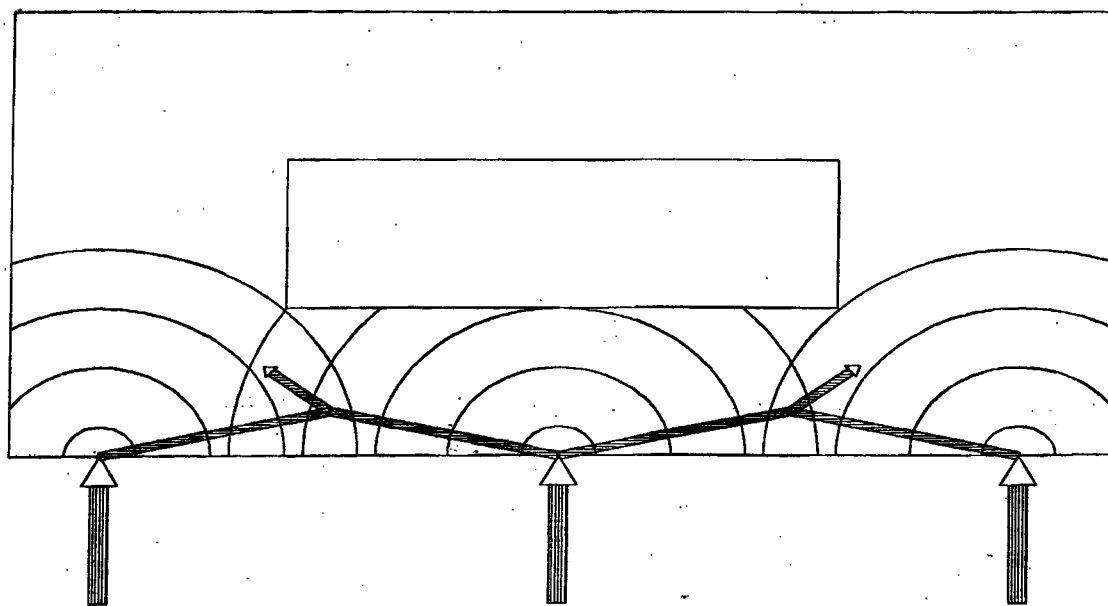


Figura 11 - Efeito de refluxo gerado por três pontos de injeção distintos [77]

Rechupe ("sink marks"): é o abaixamento da superfície da peça onde há variação considerável na espessura de parede. A contração desigual causa distorção dimensional ou rechupe. Ocorre, muitas vezes, em peças com nervuras. A Figura 12 mostra o efeito de rechupe.

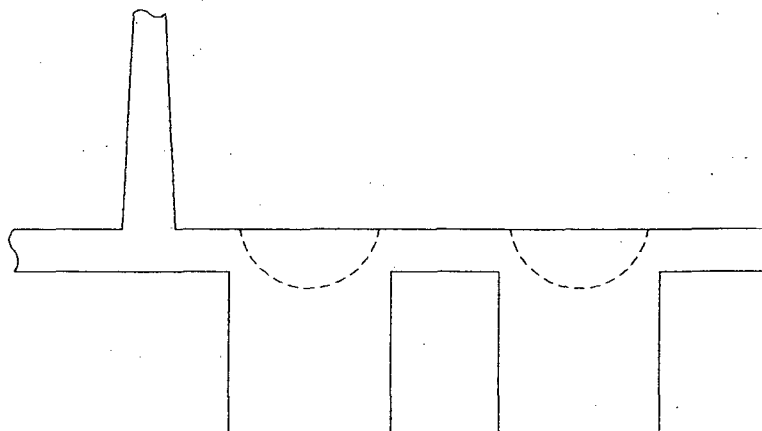


Figura 12 - Efeito de rechupe por contração diferenciada

C A P Í T U L O 3

3. MÉTODO MANUAL PARA PREVISÃO DO PREENCHIMENTO DE CAVIDADES EM MOLDES PARA INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS

O comportamento do fluxo do material no preenchimento da cavidade deve ser determinado na fase de projeto da peça e do molde, como já mencionado no capítulo anterior (item 2.3.1). Os procedimentos que permitem uma análise qualitativa e/ou quantitativa do processo de escoamento da matéria plástica no interior da cavidade são conhecidos sob o termo "**Análise Reológica**" [19].

Por análise qualitativa entende-se a geração de uma representação gráfica do escoamento do material dentro do molde. Esta representação deve fornecer informações que permitam prever:

- o tipo, a posição mais favorável e a quantidade de pontos de injeção;
- a capacidade de preencher as regiões de escoamento;
- a posição de linhas de solda;
- a posição de eventuais bolsas de ar e
- a direção de orientação principal do fluxo [16, 19, 71].

Como meios de apoio para a representação do preenchimento tem-se a disposição, por exemplo, procedimentos como a imagem de enchimento e também, mais recentemente, programas para computadores com recursos gráficos [19].

Na análise quantitativa dispõem-se de equações que, levando em conta o comportamento do material e condições de moldagem, permitem calcular grandezas que surgem durante o processo de injeção, tais como, pressão de injeção, temperaturas do material e do molde, velocidade de cisalhamento, percentual de camadas solidificadas, tensões internas, força de fechamento do molde, taxa de cisalhamento, entre outras [19, 72].

O método manual aqui apresentado corresponde a uma representação gráfica das frentes de onda se deslocando dentro da cavidade, ou seja, possibilita uma análise qualitativa do molde. A avaliação quantitativa requer a aplicação de sistemas de equações complexas, sendo quase impossível utilizá-la na prática, devido a exigência de um tempo elevado para resolução de tais equações. Os programas, descritos no capítulo 4, utilizam estas equações resolvendo-as em computadores com grande velocidade de processamento, tornando a disponibilidade dos resultados uma realidade mais próxima.

Uma representação do escoamento serve para determinar o avanço do material para diferentes tempos do processo de injeção, em diferentes áreas da cavidade. A representação teórica do escoamento equivale a fabricação de peças parcialmente injetadas em moldes prontos através da injeção progressiva (com volumes escalonados). A Figura 13 mostra uma comparação entre a representação teórica (método da imagem de enchimento) e a injeção progressiva de uma experiência prática.

Os fabricantes de peças de plástico e de moldes podem obter informações importantes sobre o comportamento reológico do plástico, através da determinação prévia da frente de escoamento

no molde, pelo método da imagem de enchimento [16, 22, 23]. Com este método, tem-se disponível um procedimento para previsão do escoamento do plástico no interior de cavidades em moldes para injeção de termoplásticos sem o uso do computador. Quando esta técnica é aplicada na fase de projeto, antes do dimensionamento final do molde e do posicionamento do ponto de injeção, podem ser evitados erros que certamente implicariam em elevados custos.

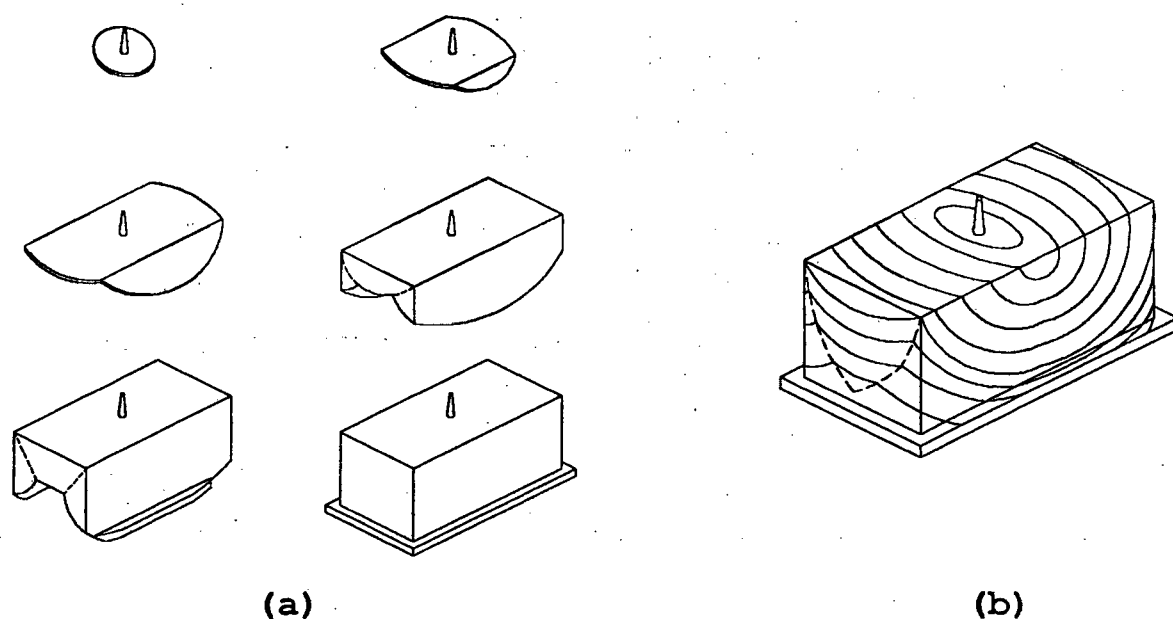


Figura 13 - Comparativo entre: a) injeção progressiva de caixa;
b) imagem de enchimento de caixa [19]

Correções, tais como alterações em regiões específicas da peça ou mudança do posicionamento e do número de pontos de injeção, são ainda facilmente executáveis nesta fase, sem que isso incorra em grandes custos. Por outro lado, se forem necessárias alterações após o molde estar pronto, estas serão extremamente caras [22, 72, 78, 79].

A localização de linhas de solda e bolsas de ar fica bastante clara. No caso de serem detectados tais defeitos, pode-se verificar se é possível eliminá-los ou reduzi-los através da variação da posição, do tipo e do número de pontos de injeção ou por meio da variação da posição de componentes do molde ou das espessuras de paredes ou ainda pela inserção de meios que facilitem ou dificultem o escoamento [19]. Além disso, este é um método de simulação extremamente barato, uma vez que não necessita da utilização de computadores, sendo realizável apenas com régua e compasso [22, 67].

O projetista deve ter em mente questões como:

- força necessária para que a máquina injetora possa preencher a cavidade;
- número de pontos de injeção;
- preenchimento homogêneo da cavidade em moldes com múltiplos pontos de injeção;
- posicionamento dos pontos de injeção e dimensionamento dos canais de alimentação para que o preenchimento seja simultâneo em moldes com cavidades múltiplas;
- posicionamento dos pontos de injeção para que as linhas de solda não fiquem em áreas críticas da peça;
- se possível, poucas e curtas linhas de solda;
- inclusão de escape de gases;
- solicitação térmica e mecânica uniforme e aceitável da massa fundida;
- possibilidades de contração da peça [22, 78].

O método aqui abordado tem sido usado, na prática, há vários anos, como auxílio para responder a tais dúvidas. Foi

utilizado pela primeira vez em 1979. Após o desenvolvimento dos princípios básicos em uma universidade alemã, o método foi aplicado na indústria. Devido a necessidade de redução do tempo e da realização de tarefas complexas, iniciou-se o seu aperfeiçoamento. Procedimentos como planificação da peça e simplificação de certas geometrias, para facilitar o desenvolvimento do projeto, fazem parte da evolução da metodologia. A soma destas possibilidades faz com que o método da imagem de enchimento seja, ainda hoje, na era dos computadores, um importante instrumento para solução de questões reológicas [22, 23].

3.1. Fundamentos Teóricos do Método da Imagem de Enchimento

Como já mencionado, o método manual representa graficamente as frentes de onda, em diferentes intervalos de tempo, durante o preenchimento da cavidade [80].

O modelo que representa o escoamento do plástico, a partir do ponto de injeção, ao longo da cavidade do molde, é baseado na teoria de propagação das ondas de Huygens. Por ela, cada ponto, em uma frente de onda, pode ser visto como gerador de uma nova onda, conhecida por onda elementar. A nova frente de onda é composta pela união de todas as novas ondas elementares e o raio de cada onda elementar é igual ao avanço da nova frente de onda, como representado na Figura 14 [19, 79].

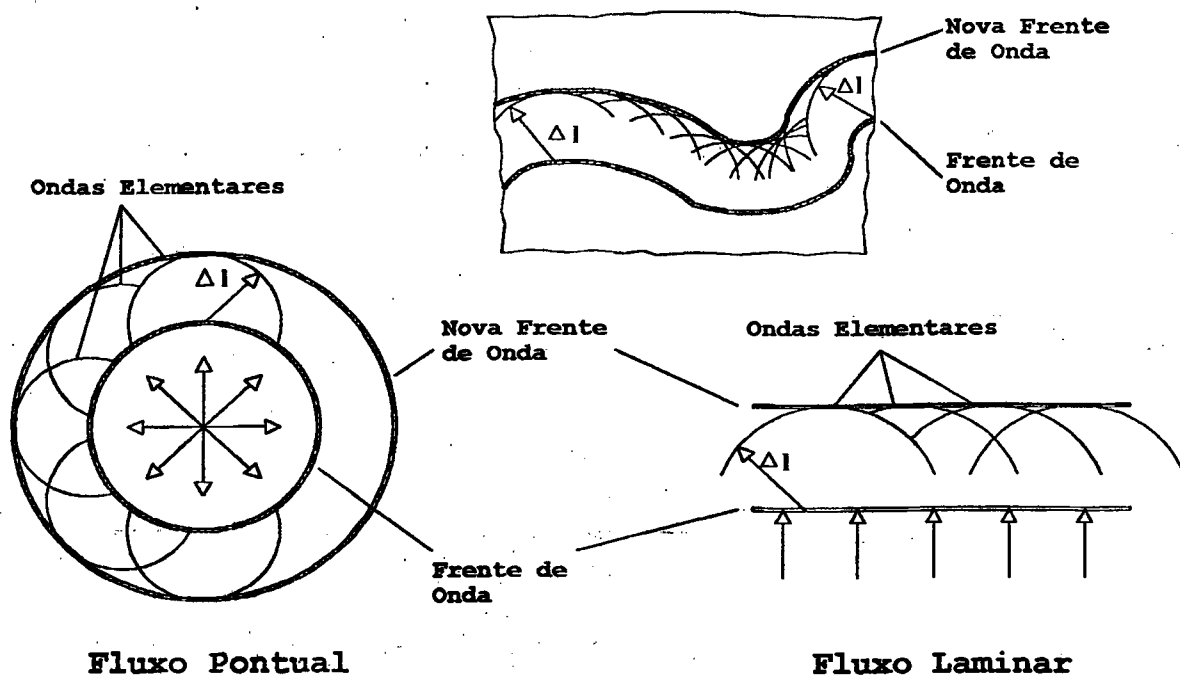


Figura 14 - Teoria de propagação de ondas [19]

Baseado na equação (1) da perda de carga de Hagen-Poiseuille, para escoamento laminar em canais com formato de placa ($H \gg B$), pode ser obtida a relação caminho percorrido/espessura de parede.

$$\Delta p = 32 \cdot \phi \cdot \vartheta_f \cdot (L \cdot \eta / H^2 \cdot B) \quad (1)$$

onde:

Δp = perda de carga

ϕ = fator para canais com largura finita e $H \gg B$; para peças injetadas, ϕ vale 1,5

ϑ_f = velocidade com que a frente de onda avança no canal

L = comprimento do canal

B = largura do canal

H = espessura do canal

η = viscosidade do fluido

Para obtenção de uma mesma perda de carga em dois segmentos diferentes faz-se

$$\Delta p_1 = \Delta p_2 \quad (2)$$

donde

$$\phi_1 \cdot g_{f1} \cdot (L_1 \cdot \eta_1 / H_1^2 \cdot B_1) = \phi_2 \cdot g_{f2} \cdot (L_2 \cdot \eta_2 / H_2^2 \cdot B_2) \quad (3)$$

Como só será levado em conta a frente de onda, é coerente assumir que:

- os fatores ϕ são iguais sobre toda a frente de onda. Este é o caso, desde que todo o trecho considerado tenha formato de placa.

- a pressão é igual, o que é fornecido automaticamente pela equação (2).

- a viscosidade, ao longo de toda a frente de onda, é igual, desde que a massa fundida mantenha a mesma temperatura por todo o percurso e não haja grande variação nas espessuras. Esta hipótese vale apenas para $H_1/H_2 < 5$.

Assumindo ainda que o fluxo tem largura constante, isto é, $B_1 = B_2$, teremos, para duas posições da frente de onda em espessuras H diferentes

$$g_{f1} \cdot (L_1 / H_1^2) = g_{f2} \cdot (L_2 / H_2^2) \quad (4)$$

e substituindo

$$g = \Delta L_1 / \Delta t \quad (5)$$

para que a frente de onda desloque-se em passos de tempos iguais ($\Delta t = \text{constante}$), a equação (4) torna-se

$$\Delta L_1 \cdot (L_1/H_1^2) = \Delta L_2 \cdot (L_2/H_2^2), \quad (6)$$

mas

$$L_1 = \Delta L_1,$$

então tem-se

$$\Delta L_1/H_1 = \Delta L_2/H_2 \quad (7)$$

ou ainda

$$L_1/L_2 = H_1/H_2. \quad (8)$$

A equação (8) mostra que o avanço e a espessura da frente de onda, em diferentes áreas da cavidade, mantém a mesma relação para um mesmo intervalo de tempo [22, 67].

Esta relação é válida considerando-se que o calor gerado pelo efeito de fricção contra a parede e a transferência de calor, através da parede, sejam aproximadamente iguais para diferentes seções de escoamento, garantindo, desta forma, um comportamento térmico estável da massa fundida. Para vazões utilizadas na prática, as medições tem-se mantido dentro de valores aceitáveis. Exceções ocorrem para velocidades de enchimento muito baixas, devido ao efeito de "congelamento" da massa fundida [22, 79].

A experiência, hoje acumulada, mostra que a representação teórica das frentes de onda equivale, de forma bastante confiável, à grande maioria dos casos práticos já testados, mesmo com os mais diversos materiais. A partir deste fato, pode-se concluir que as frentes de onda são supridas em todos os lugares igualmente com a massa fundida [19].

3.2. Casos Básicos de Construção da Imagem de Enchimento

A construção das frentes de onda baseia-se no conhecimento de alguns casos básicos. Esta técnica também pode ser utilizada em peças complexas, uma vez que sejam aplicados corretamente estes casos. As frentes de onda podem ser alteradas por uma barreira frontal ou pela passagem de uma espessura de parede para outra. São quatro os casos básicos, quais sejam, uma placa de espessura constante com um furo quadrado, uma placa de espessura constante com um furo redondo, uma placa com duas espessuras de parede diferentes e injeção na área mais espessa e uma placa com duas espessuras de parede diferentes e injeção na área mais fina. A seguir é descrita a maneira como são representados estes casos [22].

3.2.1. Caso Básico 1 - Placa de Espessura Constante com um Furo Quadrado

Este caso representa um paralelepípedo de forma quadrangular inserido em uma cavidade de espessura constante. Para geração da imagem de enchimento traça-se, com centro no

ponto de injeção (PI), arcos de circunferência concêntricos, com raio qualquer, como mostra a Figura 15.a. Eles representam as frentes de onda em determinados intervalos de tempo. Quando a massa fundida encontrar a barreira (buraco), são construídas as linhas auxiliares l_1 , l_2 , l_3 e l_4 para determinar as regiões de sombra, conforme a Figura 15.b. A partir dos pontos A, B, C e D, são traçados novos arcos como demonstrado na Figura 15.c. A linha tracejada representa o encontro das frentes de onda, que formam assim uma linha de solda [22, 81].

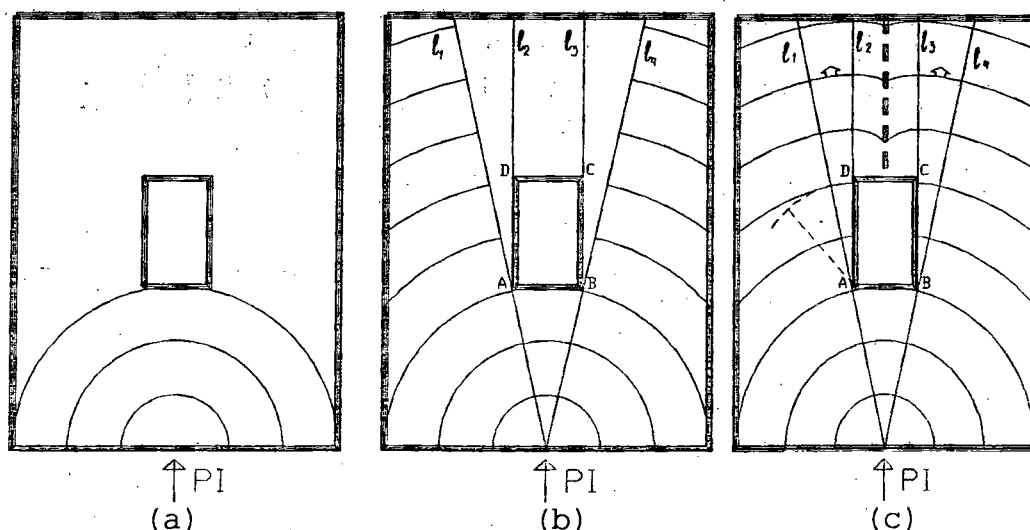


Figura 15 - Caso básico 1: a) frentes de onda concêntricas; b) linhas de auxílio; c) frentes de onda e linha de solda nas regiões de sombra

É importante notar aqui, que a perda de carga deve ser igual para um mesmo caminho percorrido, ou seja, até cada frente de onda. Considerando que a perda de carga, devido a alteração da direção em um obstáculo, é muito inferior que por atrito do material com a parede fria [22], pode-se adotar a mesma distância entre as frentes de onda.

3.2.2. Caso Básico 2 - Placa de Espessura Constante com um Furo Redondo

O segundo caso é caracterizado por um inserto em forma cilíndrica que atravessa a cavidade de espessura constante. O princípio utilizado é o mesmo do caso anterior e a construção é muito semelhante, exigindo apenas um pouco mais de trabalho.

Inicialmente, o fluxo avança concentricamente ao ponto de injeção PI, como mostra a Figura 16.a. As linhas l_1 e l_2 , tangentes ao círculo, limitam a região de sombra, da mesma forma como no primeiro caso. Mede-se, então, a distância entre o ponto de tangência da reta l_1 com o círculo e a frente de onda 5. A seguir divide-se este comprimento em segmentos, por exemplo, de 4 partes. Estes segmentos são desenhados sobre a circunferência e, em cada ponto sobre o círculo, traçam-se as linhas tangentes l_3 , l_4 e l_5 como mostrado na Figura 16.b. Inicia-se, a partir do primeiro ponto de tangência, a traçar arcos cada vez menores até que estes encontrem as linhas tangentes conforme a Figura 16.c. Desta forma obtém-se a frente de onda na região não diretamente alcançada pelo fluxo principal.

Como já mencionado, a distância até cada ponto na frente de onda é idêntica. A linha tracejada mostra o encontro das frentes de fluxo (linha de solda) [22, 81].

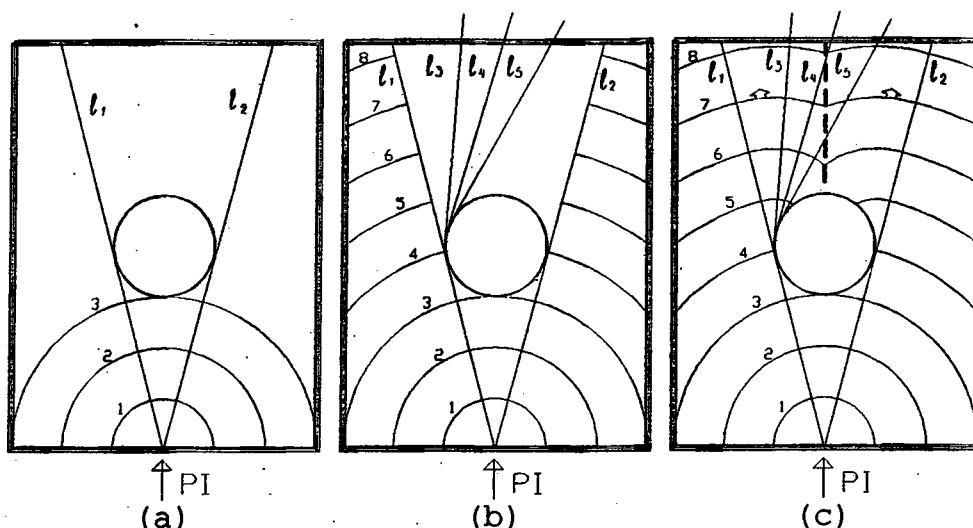


Figura 16 - Caso básico 2: a) frentes de onda concêntricas; b) linhas de auxílio a partir do círculo dividido; c) frentes de onda e linha de solda nas regiões de sombra

3.2.3. Caso Básico 3 - Placa com Duas Espessuras de Parede Diferentes e Injeção na Área mais Espessa

O terceiro caso pode ser visto como o escoamento do material de uma região espessa para o interior de uma região mais fina. Conforme a equação (8), quando o material avança, por exemplo, 20 mm no lado mais espesso, o caminho será de 10 mm para uma espessura igual a metade desta. A Figura 17 mostra a representação em corte do escoamento em uma cavidade com duas espessuras de parede diferentes, onde H_1 é igual ao dobro de H_2 .

A maneira de construir a imagem de enchimento está mostrada nas próximas três figuras pela frente de onda 3 (Figura 18). Até a frente de onda 2 o material avança concentricamente ao ponto de injeção na região mais espessa (I). Deve-se fazer com que a frente de onda 2 coincida com a linha de variação da espessura

LVE, tal como mostra a Figura 18.a. A seguir traça-se um arco de circunferência para a frente de onda 3 na região espessa (I).

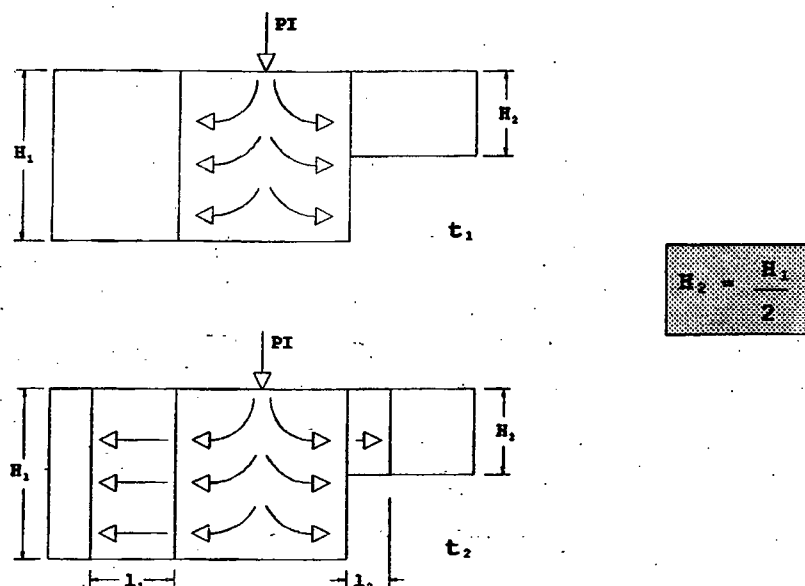


Figura 17 - Escoamento em duas regiões de espessuras diferentes

A intersecção deste círculo com a LVE determina dois pontos auxiliares A e B para a construção da nova frente na região mais fina (II). Determina-se um terceiro ponto auxiliar C sobre a perpendicular a linha de variação da espessura passando pelo ponto de injeção. Num exemplo numérico com H_1 igual a 4 mm na região I e H_2 igual a 2 mm na região II, se o material escoar 20 mm da frente 1 até a frente 2 na região I, então na região II avançará apenas 10 mm. Esta medida é traçada na perpendicular partindo do ponto de intersecção com a LVE. Com isso tem-se 3 pontos da nova frente de onda como indicado na Figura 18.b. Traça-se então uma linha do ponto A ao C e do B ao C. Estas linhas representam a frente de onda 3 na região mais fina. Procede-se da mesma maneira com as outras frentes de onda, tal

como representado na Figura 18.c. Esta forma de traçar as frentes de onda é denominada de método das tangentes [22, 81].

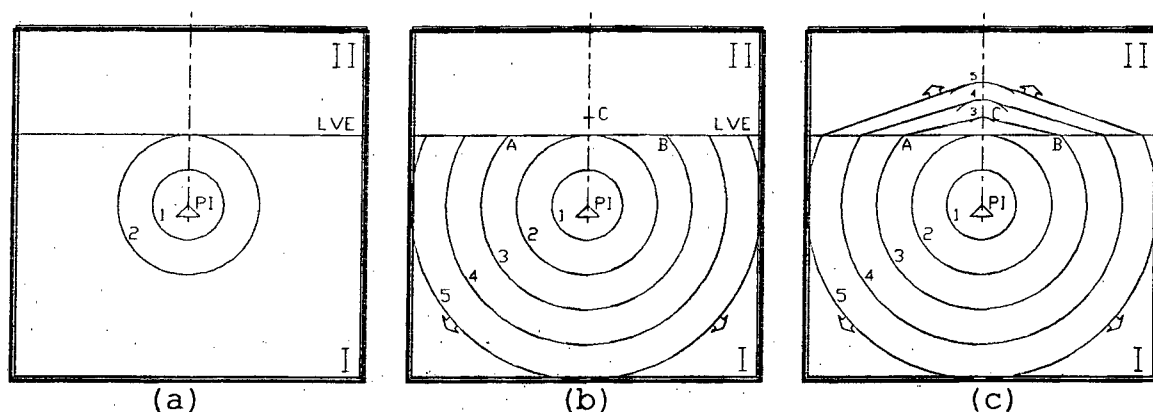


Figura 18 - Método das tangentes: a) frentes de onda concêntricas; b) pontos auxiliares; c) frentes de onda na região delgada

Uma forma mais refinada de apresentar os resultados pode ser obtida pelo método dos pontos de centro. Parte-se do resultado obtido no método anterior e traça-se uma perpendicular pelo centro da linha AC até encontrar a linha que cruza o ponto PI, como demonstra a Figura 19.a. Este ponto de intersecção será o centro da circunferência que passa pelos pontos A e C definindo a nova frente de onda mostrada pela Figura 19.b. Nota-se claramente que a representação das frentes de onda é mais adequada quando apresentada por este método, uma vez que as linhas são mais suaves e traduzem, de forma melhor, o comportamento natural do escoamento.

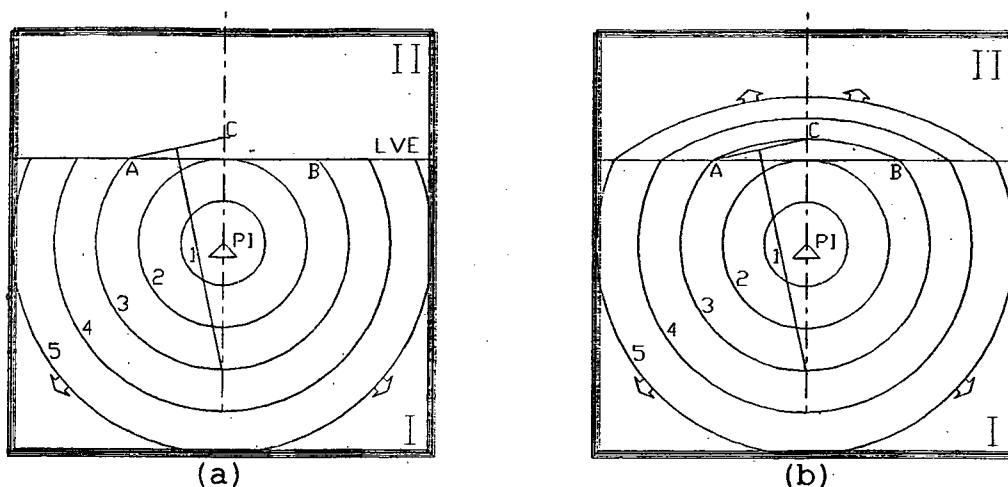


Figura 19 - Método dos pontos de centro: a) definição do centro da frente de onda; b) frentes de onda na região delgada

3.2.4. Caso Básico 4 - Placa com Duas Espessuras de Parede Diferentes e Injeção na Área mais Fina

Neste último caso, semelhante ao anterior, tem-se o ponto de injeção na região mais fina da cavidade. Será apresentado a seguir um exemplo numérico para melhor caracterização do método.

Para tal serão definidos:

L_{1p} = distância percorrida na região I

L_{1r} = distância a percorrer na região I

L_{2p} = distância percorrida na região II

L_{2r} = distância a percorrer na região II

H_1 = espessura da região I

H_2 = espessura da região II

p_1 = passo da frente de onda na região I

p_2 = passo da frente de onda na região II

Assumindo que a espessura H_1 é igual a 2 mm, que H_2 vale 4 mm e que o passo p_1 na região de injeção I é de 10 mm, inicia-se a execução do método. Do ponto de injeção PI partem frentes de

onda concêntricas até a LVE. Traça-se linhas auxiliares a partir de PI, neste caso ℓ_1 e ℓ_2 , como mostra a Figura 20.a. Sobre a linha que passa por PI perpendicular a LVE, a frente de onda 3 desloca-se de um valor dado pela equação 9, isto é,

$$p_1/p_2 = H_1/H_2 \quad (9)$$

Aplicando os valores, temos $p_2 = 20$ mm. Traça-se, portanto, o primeiro ponto da nova frente de onda (Figura 20.b). A frente de onda 3 avançou sobre ℓ_1 , até atingir a LVE, uma determinada distância $L_{1p} = 2$ mm. Restaria ainda percorrer:

$$L_{1r} = p_1 - L_{1p} \quad (10)$$

o que nos fornece

$$L_{1r} = 10 \text{ mm} - 2 \text{ mm} = 8 \text{ mm}.$$

Com base na equação (8), é possível obter o valor do caminho a ser percorrido pela frente de onda na região II. Assim,

$$L_{1r}/L_{2r} = H_1/H_2 \quad (11)$$

de onde tira-se

$$L_{2r} = 16 \text{ mm}.$$

Esta será a distância a ser percorrida pela frente de onda 3 na região II sobre a linha ℓ_1 . Com centro na intersecção da

linha l_1 é LVE, traça-se um arco com raio igual a L_{2r} (Figura 20.c).

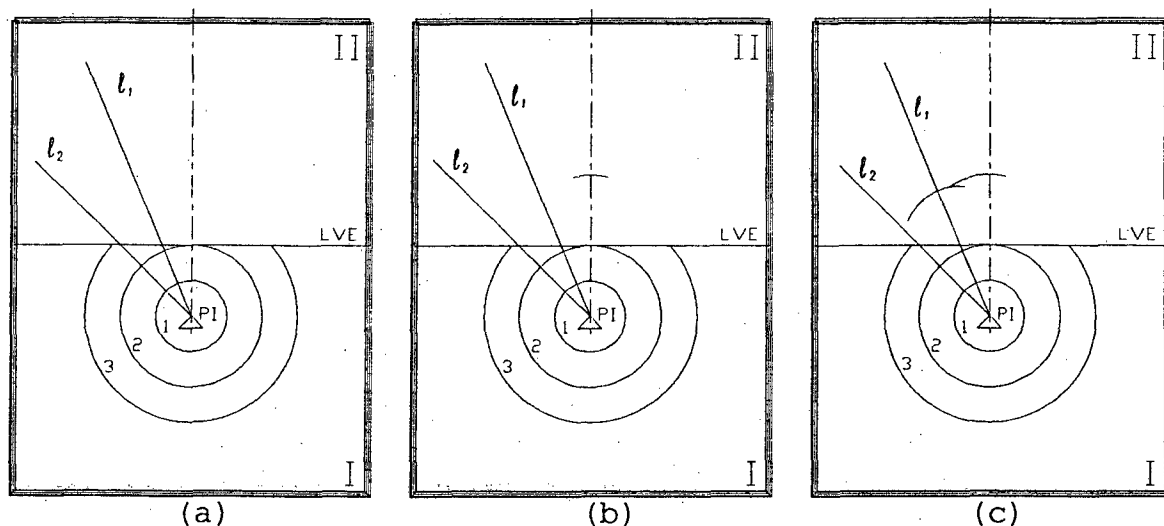


Figura 20 - Caso básico 4: a) frentes de onda concêntricas e linhas de auxílio; b) ponto na região II; c) frente de onda na região II

A Figura 21 mostra detalhadamente a forma como deve ser traçada a frente de onda 3.

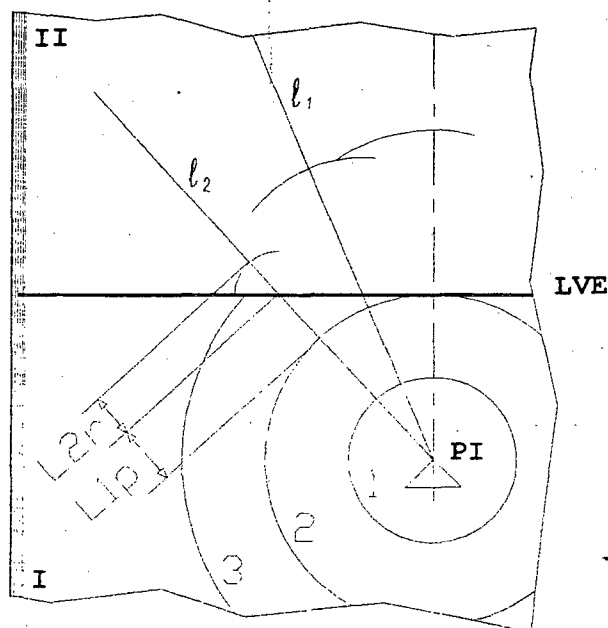


Figura 21 - Determinação da frente de onda 3 na região mais espessa

É possível notar, na Figura 22.a, pelas frentes de onda 3 e 4, que o material injetado retorna da região mais espessa para a região mais fina.

Este fato também pode ser representado graficamente. Sobre a LVE, marca-se o centro do segmento de reta AB, entre a frente de onda 4 nas regiões I e II. Com centro em A, traça-se um arco com raio igual a metade do segmento AB. O mesmo procedimento deve ser executado para a frente de onda 3 (Figura 22.b). A partir de B, tangenciando o arco anteriormente gerado, tem-se a linha que representa o refluxo da massa fundida da região II para a região I. Nesta zona é caracterizada a formação de uma linha de solda, representada pela linha tracejada na Figura 22.c.

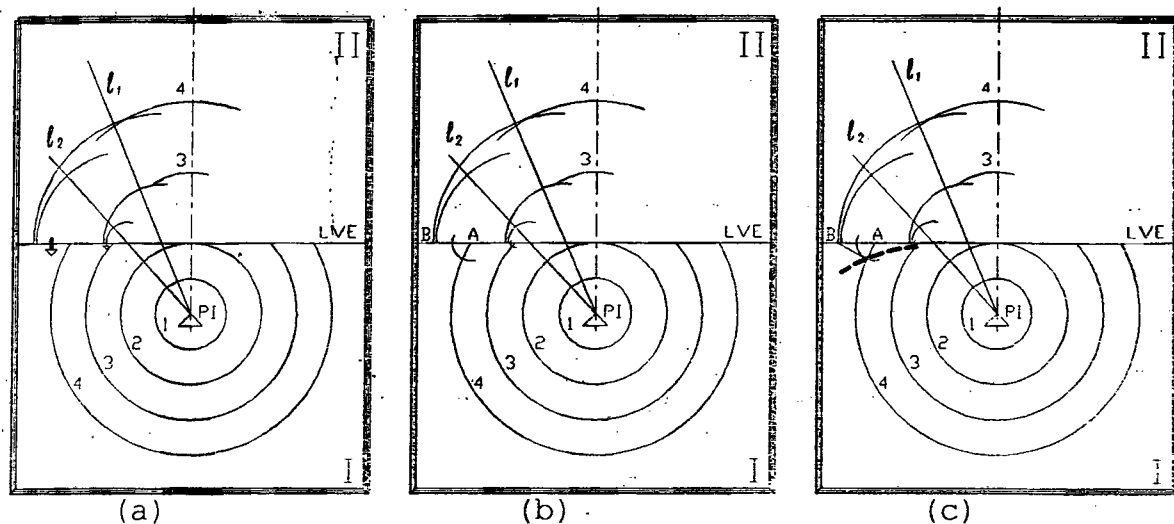


Figura 22 - Caso básico 4: a) refluxo da região II para I; b) arco para traçagem da linha de refluxo; c) linha de refluxo e de solda

Há um caminho, onde a massa fundida atinge seu ponto mais distante na região II. Ele é representado por uma linha, chamada de feixe principal (FP), e é dado por:

$$\alpha = \arcsen (H_1/H_2) \quad (12)$$

onde $H_2 > H_1$. Na Figura 23 a linha l_2 representa o feixe principal [22, 81].

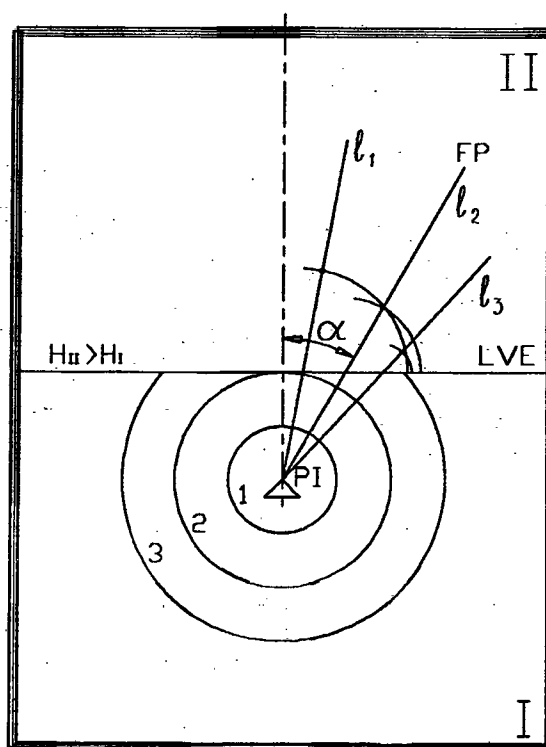


Figura 23 - Determinação da posição do feixe principal FP [22]

3.3. Utilização Simultânea dos Métodos

É possível ainda utilizar-se o método das tangentes juntamente com o método dos pontos de centro. A aplicação conjunta destes métodos está apresentada na Figura 24.a para um exemplo do 3º caso e na Figura 24.b para o 4º caso.

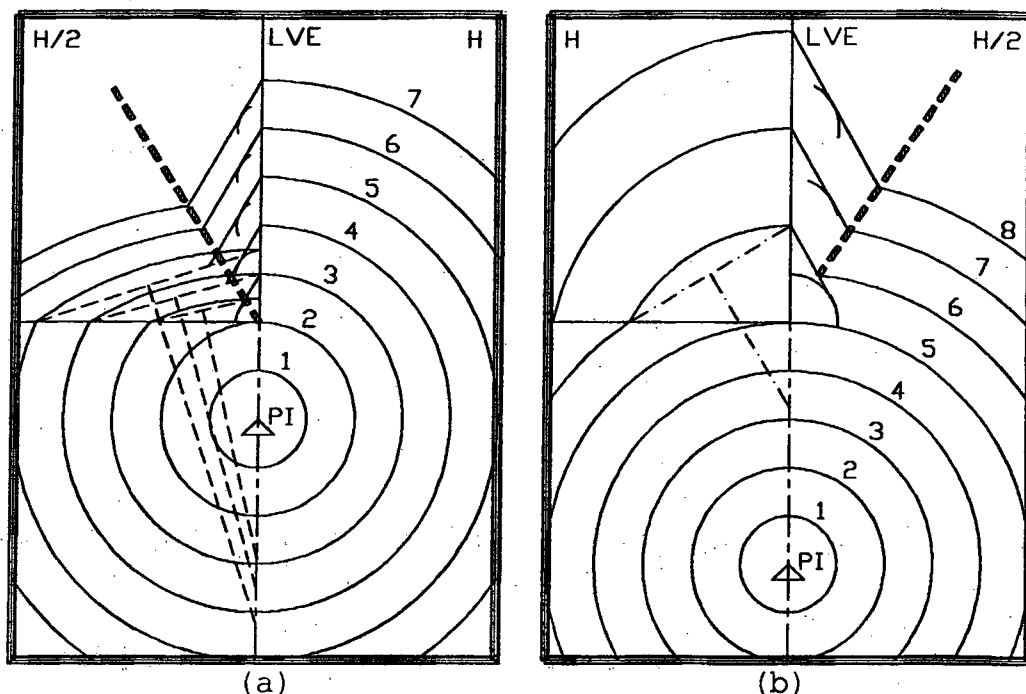


Figura 24. - Utilização conjunta do método dos pontos de centro e das tangentes: a) para o 3º caso; b) para o 4º caso [19]

3.4. Recomendações para Aplicação dos Métodos

Baseadas em várias experiências de simulação, com peças retiradas de casos práticos, pode-se utilizar, de forma a facilitar a traçagem da imagem de enchimento de casos complexos, as seguintes recomendações [19]:

- 1) O método das ondas elementares é ideal para a determinação das frentes de onda em regiões de espessura constante. Ele pode ser usado sempre, mas deve ser aplicado, principalmente, quando os outros métodos apresentarem dificuldades;
- 2) O método dos pontos de centro é recomendado para aplicação em casos onde há variação de espessura. É mais preciso que o método das tangentes, mas também mais trabalhoso;

3) O método das tangentes deve ser usado, quando há retorno do fluxo de uma região mais espessa para uma região mais delgada, no sentido transversal ao fluxo na região mais espessa. O método dos pontos de centro também pode ser utilizado neste caso, embora exija muito mais trabalho.

4) O passo da frente de onda deve ser escolhido de tal forma que atinja exatamente o(s) ponto(s) na cavidade onde haverá alteração na forma de construção da imagem de enchimento. Estes pontos podem ser linhas de variação da espessura, regiões de sombra, posições onde há refluxo da região mais espessa para a região mais fina ou encontro de frentes de onda que causem linhas de solda e/ou inclusões de ar.

3.5. Preparação de uma Simulação com o Método Manual

A verificação do fluxo do plástico, em uma cavidade, através do método da imagem de enchimento, deve ser realizada, de uma forma sequencial, pelas seguintes etapas [23]:

1. Análise da geometria da peça;
2. Simplificação da geometria real;
3. Planificação da peça;
4. Determinação do número e posição de pontos de injeção;
5. Construção do método da imagem de enchimento;
6. Avaliação da imagem de enchimento construída.

As etapas de 4 a 6 devem ser repetidas até que seja obtido um resultado aceitável.

De uma boa execução da etapa 3 dependerá a confiabilidade do resultado obtido, isto é, a forma como a peça será cortada

deve garantir uma planificação perfeita ou, pelo menos, com pequenos erros. Para obtenção da planificação são necessárias, essencialmente, três operações geométricas [19]:

- o corte de uma superfície ao longo da aresta do sólido;
- o rebatimento da superfície cortada sobre um eixo fixo do sólido;
- a segmentação de uma superfície curva.

As seguintes considerações e simplificações servem para a planificação e facilitarão a construção da imagem de enchimento:

- dentro do possível deve-se dividir a peça real em partes que se deixem planificar facilmente (corte nas arestas). A sequência do desenho planificado é marcada pelas arestas de ligação ou através de pontos (Figura 25).
- deve-se iniciar o método com a(s) superfície(s) que possuir(em) o(s) ponto(s) de injeção ou com aquela(s) que contiver(em) o maior caminho a ser percorrido;
- superfícies que não puderem ser rebatidas sobre o desenho plano devem ser traçadas a parte. Exemplos podem ser as nervuras, como mostra a Figura 25;
- pontos de ligação de superfícies desenhadas a parte devem ser nomeados de maneira a não deixarem dúvidas;
- com peças complicadas há a possibilidade da confecção de um modelo em papel que será posteriormente planificado. O processo inverso também é possível, isto é, a partir do desenho planificado montar um modelo tridimensional, sobre o qual ficará clara a representação do escoamento da massa fundida [19].

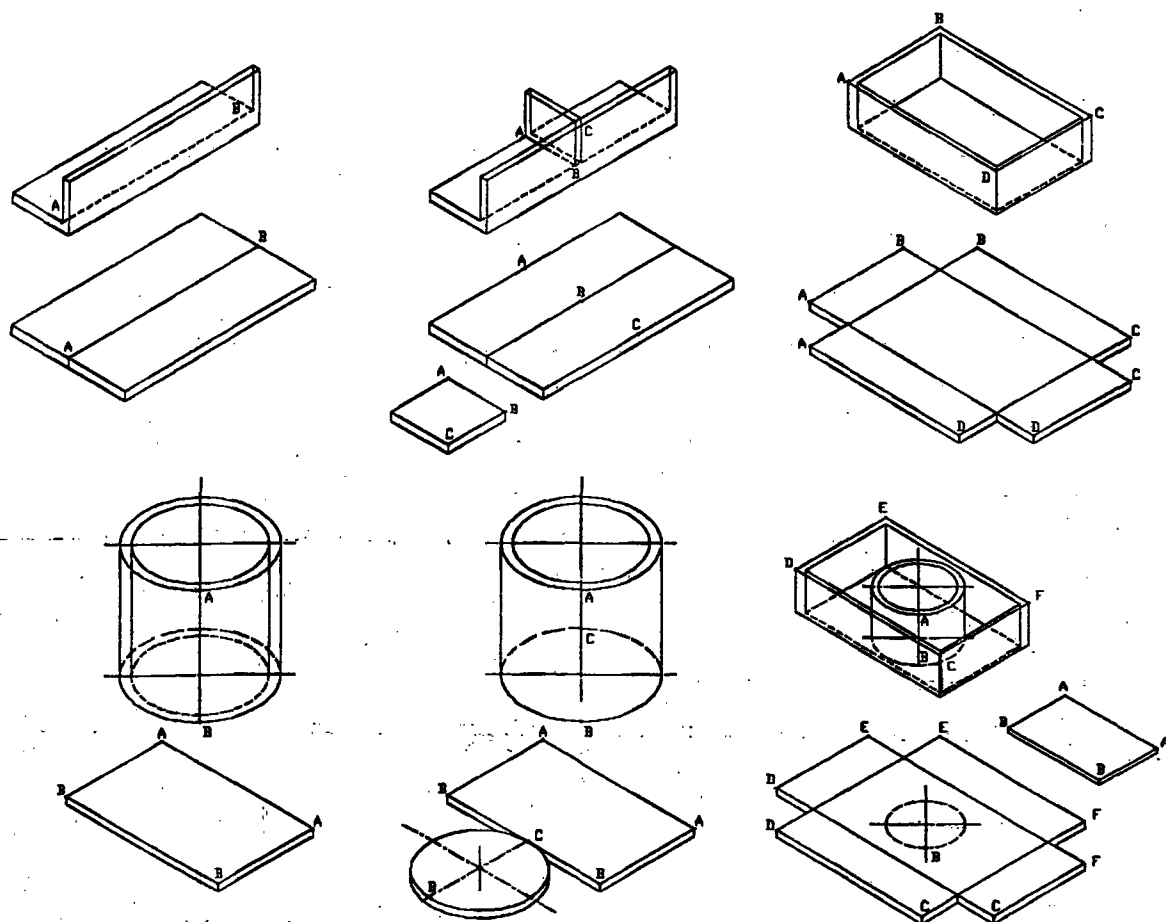


Figura 25 - Exemplos de planificação [19]

3.6. Análise de Áreas Críticas

3.6.1. Linhas de Solda

As linhas de solda aparecem quando diferentes frentes de onda se encontram. Elas serão geradas sempre que houver um desvio e posterior reencontro do fluxo e quando houver mais do que um ponto de injeção. No procedimento da imagem de enchimento pode-se reconhecer como pontos da linha de solda os "joelhos" formados pelas frentes de onda. A linha de solda é representada pela união destes pontos. Quanto menor for o ângulo de encontro

entre as frentes de onda, tanto mais acentuada será a marca da linha de solda e, conseqüentemente, menor a qualidade mecânica e visual da junção (Figura 26). Uma das propriedades mecânicas mais afetadas pela formação de linhas de solda é a resistência ao dobramento, que cai consideravelmente [19, 80].

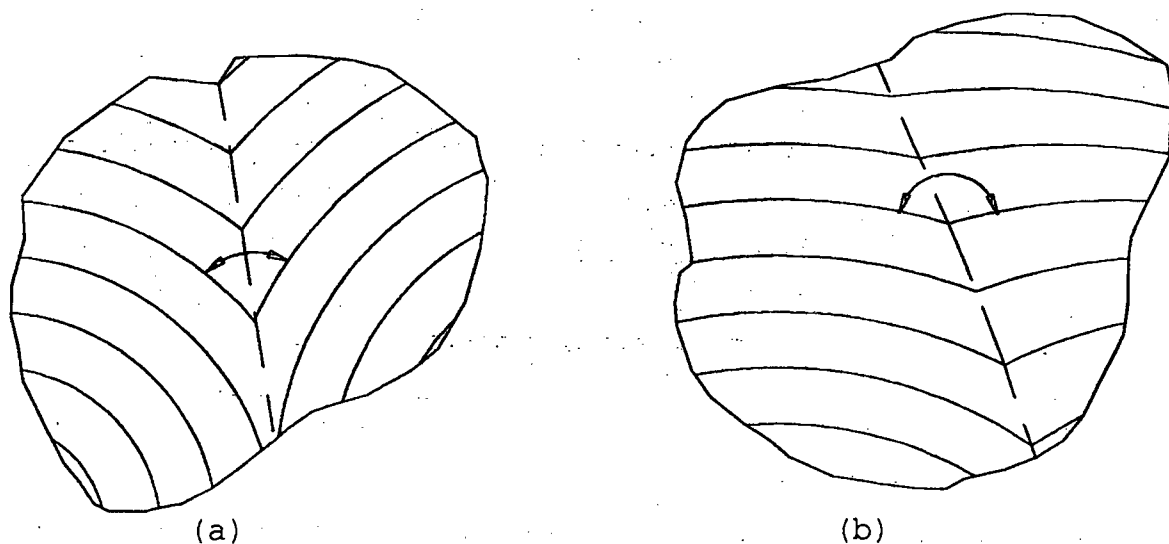


Figura 26 - Linha de solda: a) fortemente marcada, baixa qualidade; b) fracamente marcada, qualidade superior [19]

Linhas de solda próximas ao ponto de injeção são menos críticas do que as posicionadas ao longe, pois estão a uma temperatura relativamente alta e podem ainda ser perturbadas pela massa fundida que está entrando na cavidade, proporcionando, desta forma, uma agregação maior do material. Em linhas de solda distantes do ponto de injeção podem surgir uniões fracas devido a má soldagem causada pelo resfriamento da massa fundida [19, 79].

3.6.2. Bolsas de Ar

Bolsas de ar ou inclusões de ar podem surgir no encontro de mais do que duas frentes de onda ou em cantos da cavidade, quando o ar não pode escapar pela linha de junta ou por outro caminho natural (Figura 27). O ar é então aprisionado, comprimido e aquecido. Tal fato pode ter como consequência, dependendo da pressão e velocidade de injeção, a queima do material pelo efeito Diesel [19, 79, 80].

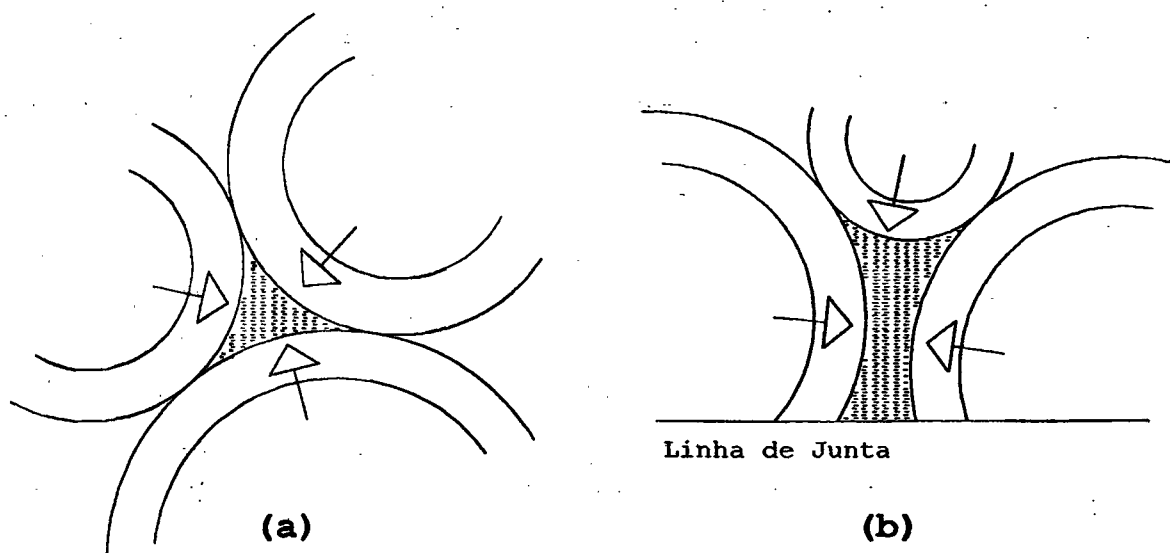


Figura 27 - Bolsas de ar: a) situação crítica; b) situação favorável [19]

A Figura 28 mostra um exemplo de formação de uma bolsa de ar em uma placa com rebaixamento cilíndrico.

Possíveis soluções para evitar a formação de inclusões de ar são o polimento adequado da superfície de separação do molde, além da utilização de recursos, tais como, a adição de superfícies de saída suplementares, colocação de extratores na região de ocorrência provável da bolsa de ar, inserção de barras

de aeração, reposicionamento do(s) ponto(s) de injeção e alteração da espessura de parede da peça [19].

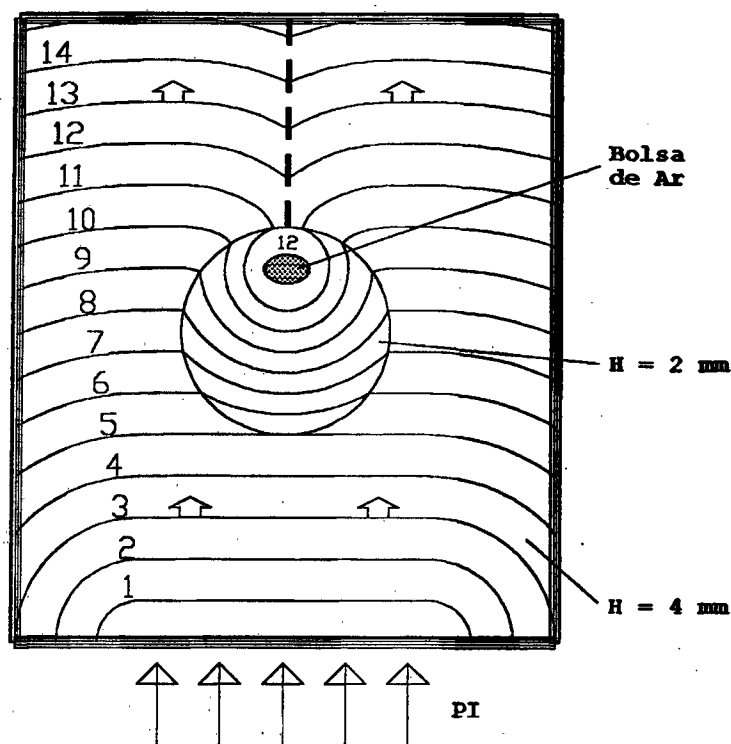


Figura 28 - Exemplo de formação de bolsa de ar [22]

3.7. Limitações do Método Manual

O método é limitado para uma relação de espessuras com fator maior que 2 ou se a injeção for muito lenta [22, 79, 80]. Nestes casos é possível prever-se a posição de linhas de solda com o uso de programas para calculadoras de bolso, que permitem determinar o valor da perda de pressão, para a geometria da cavidade, em relação à velocidade de injeção [22].

Deve-se observar, de antemão, que o método da imagem de enchimento não atende a equação da continuidade, especialmente em casos onde há múltiplos pontos de injeção [22, 80].

Diferenças entre as frentes de onda teóricas e práticas não devem ser sempre atribuídas às medidas simplificativas adotadas no método da imagem de enchimento. Outros motivos práticos podem causar tais distorções, entre eles, variações das espessuras de parede fabricadas em relação as projetadas, utilização de máquinas com pouca capacidade de injeção, entrada não simultânea no caso de múltiplos pontos de injeção e movimento relativo do molde causado por forças não simétricas, durante o preenchimento, acarretando alteração parcial das espessuras da cavidade. Estes fatores tem normalmente máis influência sobre a exatidão da simulação do que as próprias simplificações adotadas na representação teórica do escoamento [22].

Medições em peças reais práticas mostraram que há frequentemente variações de até 20% entre a espessura de parede projetada e a fabricada. Os erros de fabricação nas espessuras de parede influenciam, na mesma proporção, sobre as posições das frentes de onda na representação teórica [23].

No geral, não se deve esquecer que o método da imagem de enchimento é um procedimento que, com um pouco de trabalho, deve fornecer uma análise suficiente para prever o preenchimento da cavidade. Ele tem se comportado de forma aceitável, ao longo dos anos, indicando a posição de áreas críticas (linhas de solda e inclusões de ar) [79, 80], também para peças complexas, principalmente, se comparado à forma anterior de avaliação reológica, baseada apenas na sensibilidade e experiência do projetista [22].

C A P Í T U L O 4

4. SIMULAÇÃO ASSISTIDA POR COMPUTADOR DO PREENCHIMENTO DE CAVIDADES EM MOLDES PARA INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS

A metodologia, descrita no capítulo anterior, reflete o crescente interesse numa melhor avaliação da ferramenta de injeção, já na fase de projeto, com o intuito de reduzir os custos na fabricação. Porém, para a realização da análise quantitativa, é necessário um grande esforço na resolução de cálculos complexos, os quais consomem uma parcela considerável do tempo de produção de uma peça.

Como a pressão em reduzir os prazos de projeto e de avaliação do molde é cada vez maior, é necessária a introdução de computadores nestas áreas. As melhorias conseguidas com tal medida devem compensar o aumento dos custos relacionados à implantação do novo sistema [80]. No decorrer do projeto de um molde, auxiliado por computador, tem-se um processo interativo bastante forte entre o projetista e o sistema. Do primeiro partem a experiência e as idéias da fase de projeto enquanto que o segundo oferece uma gama elevada de possibilidades de cálculo e acesso às bases de dados com informações de projeto e fabricação.

Os programas de simulação do processo de enchimento em moldes para injeção de plásticos, apresentam, graficamente, na tela do computador, dados como distribuição de pressão, tempo de enchimento, distribuição de temperatura, perfil de velocidades,

entre outros, facilitando sobremaneira a interpretação dos resultados e possibilitando a visualização gráfica e dinâmica de linhas de solda e bolsas de ar, antes mesmo da construção do molde [26].

4.1. Fundamentos Teóricos dos Programas de Simulação

As leis que descrevem o movimento de um fluido não são de fácil formulação e nem de fácil manejo matemático. As equações básicas que permitem prever o comportamento dos fluidos são a da conservação da massa (continuidade), conservação da quantidade de movimento (impulso) e conservação da energia (movimento), associadas a uma equação de estado. As equações da conservação, escritas no sistema cartesiano de coordenadas, são dadas por [82]:

$$\partial p / \partial t + \partial / \partial x_j (\rho u_j) = 0 \quad (13)$$

$$\partial / \partial t (\rho u_i) + \partial / \partial x_j (\rho u_i u_j) = -\partial P / \partial x_i + \partial / \partial x_j (\mu \cdot \partial u_i / \partial x_j) + S^{\mu i} \quad (14)$$

$$\partial / \partial t (\rho T) + \partial / \partial x_j (\rho u_j T) = \partial / \partial x_j (k / c_p \cdot \partial T / \partial x_j) + S^T \quad (15)$$

As equações acima podem ser escritas para um campo escalar geral ϕ , neste caso expandindo os termos, obtendo-se:

$$\begin{aligned} \partial / \partial t (\rho \phi) + \partial / \partial x (\rho u \phi) + \partial / \partial y (\rho v \phi) + \partial / \partial z (\rho w \phi) = \\ \partial / \partial x (\Gamma^\phi \cdot \partial \phi / \partial x) + \partial / \partial y (\Gamma^\phi \cdot \partial \phi / \partial y) + \partial / \partial z (\Gamma^\phi \cdot \partial \phi / \partial z) + S^\phi \end{aligned} \quad (16)$$

A Tabela 6 mostra os valores de S^ϕ para as diversas variáveis no caso tridimensional compressível e viscosidade constante da equação (16).

Tabela 6 - Valores de ϕ , Γ e S^ϕ

Equações da Conservação	ϕ	Γ	S^ϕ
Massa Global	1	0	0
Quantidade de Movimento em x	u	μ	$-\partial P/\partial x + 1/3 \cdot \mu \cdot \partial/\partial x (\partial u/\partial x + \partial v/\partial y + \partial w/\partial z)$
Quantidade de Movimento em y	v	μ	$-\partial P/\partial y + 1/3 \cdot \mu \cdot \partial/\partial y (\partial u/\partial x + \partial v/\partial y + \partial w/\partial z)$
Quantidade de Movimento em z	w	μ	$-\partial P/\partial z + 1/3 \cdot \mu \cdot \partial/\partial z (\partial u/\partial x + \partial v/\partial y + \partial w/\partial z)$
Energia*	T	k/c_p	$1/c_p \cdot DP/Dt + \mu/c_p \cdot \Phi$

Além das equações da conservação, a resolução do problema de escoamento requer ainda uma equação de estado, dada por [82]:

$$\rho = \rho(P, T) \quad (17)$$

Desta forma, obtém-se, para um problema tridimensional compressível, seis equações (continuidade, Navier-Stokes nas três direções, energia e estado) para seis incógnitas (ρ , u , v , w , P e T).

* Φ é o termo de dissipação viscosa. A equação para Φ pode ser encontrada em [83].

Para se obter um resultado exato deste sistema, seria necessária a resolução simultânea de todas as equações, o que representa um esforço inviável na prática.

Devido às peças apresentarem, normalmente, parede fina, é adotada uma simplificação da geometria, ou seja, considerando-a como um corpo definido por cascas de espessura delgada. Desta forma, o fluxo do plástico é descrito como um problema de escoamento superficial. O fluxo transversal, na direção das paredes da cavidade, é então desprezado, e o sistema tridimensional de equações diferenciais, assumido inicialmente, fica reduzido a um problema unidimensional [26].

Adicionalmente, algumas hipóteses simplificativas são assumidas pela maioria dos programas, baseados em métodos numéricos, para análise do fluxo em cavidades [67]:

- a massa é considerada como incompressível, durante o processo de enchimento da cavidade;
- as forças de gravidade, inércia e tensão normal são desprezadas;
- não há troca de calor no sentido do escoamento;
- a condutibilidade térmica, o calor específico e a densidade são consideradas constantes. Alguns programas levam em consideração funções para calcular tais grandezas.

As equações de conservação para o caso de escoamento unidimensional e incompressível são apresentadas na Figura 29.

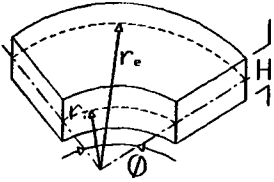
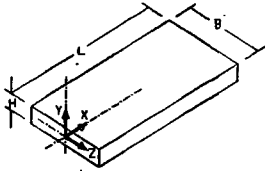
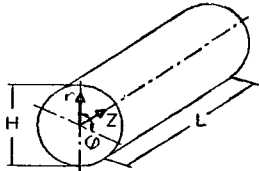
DISCO	PLACA	CILINDRO
		
$\partial(r \cdot v_r) / \partial r = 0$	Conservação da Massa $\partial v_x / \partial x = 0$	$\partial v_z / \partial z = 0$
$\rho v_r (\partial v_r / \partial r) =$ $(1/r) \cdot \partial(r \cdot \sigma_{rr}) / \partial r$ $- \sigma_{\phi\phi} / r - \partial \sigma_{rz} / \partial z$	Cons. da Quantidade de Movimento $0 = - \partial \sigma_{xx} / \partial x$ $- \partial \sigma_{yx} / \partial y$	$0 = - \partial \sigma_{zz} / \partial z$ $- 1/r \partial(r \cdot \sigma_{rz}) / \partial r$
$\rho c_p (\partial \theta / \partial t + v_r \cdot \partial \theta / \partial r)$ $=$ $\lambda \cdot \partial^2 \theta / \partial z^2 - [\sigma_{rr} \cdot \partial v_r / \partial r$ $+ \sigma_{\phi\phi} \cdot v_r / r] - \sigma_{rz} \cdot \partial v_r / \partial z$	Cons. da Energia $\rho c_p (\partial \theta / \partial t + v_x \cdot \partial \theta / \partial x)$ $=$ $\lambda \cdot \partial^2 \theta / \partial y^2 - \sigma_{xy} \cdot \partial v_x / \partial y$	$\rho c_p (\partial \theta / \partial t + v_z \cdot \partial \theta / \partial z)$ $=$ $\lambda \cdot \partial^2 \theta / \partial r^2 + \lambda / r \cdot \partial \theta / \partial r$ $- \sigma_{zr} \cdot \partial v_z / \partial r$

Figura 29 - Equações básicas simplificadas para a condição unidimensional e incompressível [19]

Para cada simulação do processo de injeção é necessário, primeiramente, representar a geometria da peça em uma forma matemática adequada. No caso de uma geometria complexa, como a cavidade de um molde, a resolução do sistema de equações diferenciais necessita a adoção de algum método numérico de aproximação [19]. Para isto, existem duas possibilidades:

- a transformação da geometria planificada em segmentos (placas, discos e cilindros). A Figura 30 mostra a caracterização dos segmentos mais comumente utilizados.

Tipo de Segmento	DISCO	PLACA	CILINDRO
Denominação	D	P	C
Comprimento	r_e	L	L
Espessura	H	H	H
Raio Inicial / Largura	r_i	B	-
Ângulo	ϕ	-	-

Figura 30 - Discretização em segmentos [67]

O cálculo das grandezas que surgem durante o escoamento é então realizado, a partir das equações conhecidas para os elementos de geometria citados, como exemplifica a Figura 31, por meio de um método numérico com pequenos intervalos de tempo [19] ou através do cálculo analítico [67, 80]. Em [84] estão apresentadas equações complementares para tensões internas (global e na parede da cavidade), velocidades de cisalhamento (global, média e na parede da cavidade), velocidades de escoamento (global, média e máxima) e perda de pressão.

- a discretização da geometria para aplicação de um método numérico. Neste caso, a resolução do sistema de equações diferenciais é feita em pequenos intervalos de tempo, para cada nó da malha, utilizando métodos numéricos [19].

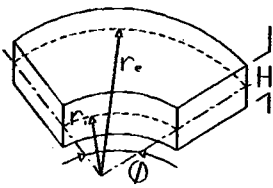
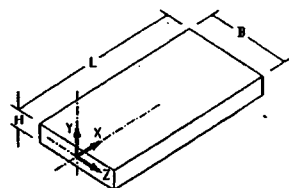
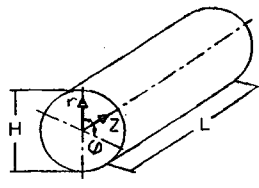
DISCO	PLACA	CILINDRO
		
$v_r = \int_0^{H/2} \int_0^z \left[\left(-\frac{\partial p}{\partial r} \right) - \left(\frac{v_r}{r} \right) \cdot (1,5\eta_0/r) - \rho \cdot v_r \right] dz \cdot dz$	Distribuição Velocidades $v_x = \left(-\frac{\partial p}{\partial x} \right) \cdot \int_y^{H/2} \left(\frac{1}{\eta} \right) \cdot y \cdot dy$	$v_z = \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{\partial p}{\partial z} \right) \cdot \int_r^R \left(\frac{1}{\eta} \right) \cdot r \cdot dr$
$v_r = \left(\frac{2}{H} \right) \cdot \left(-\frac{\partial p}{\partial r} \right) \cdot \int_0^{H/2} \left(\frac{1}{\eta} \right) \cdot z^2 \cdot dz$	Velocidade Média $v_x = \left(\frac{2}{H} \right) \cdot \left(-\frac{\partial p}{\partial x} \right) \cdot \int_0^{H/2} \left(\frac{1}{\eta} \right) \cdot y^2 \cdot dy$	$v_z = \left(\frac{1}{2R^2} \right) \cdot \left(-\frac{\partial p}{\partial z} \right) \cdot \int_0^R \left(\frac{1}{\eta} \right) \cdot r^3 \cdot dr$
$\left(-\frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = \left(\frac{1}{\eta} \right) \cdot \int_0^z \left[\left(-\frac{\partial p}{\partial r} \right) - \left(\frac{v_r}{r} \right) \cdot (1,5\eta_0/r) - \rho v_r \right] \cdot dz$	Velocidade Cisalhamento $\left(-\frac{\partial v_x}{\partial y} \right) = \left(-\frac{\partial p}{\partial x} \right) \cdot \left(\frac{1}{\eta} \right) \cdot y$	$\left(-\frac{\partial v_z}{\partial r} \right) = \left(\frac{1}{2} \right) \cdot \left(-\frac{\partial p}{\partial z} \right) \cdot \left(\frac{1}{\eta} \right) \cdot r$
$\left(-\frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{V}{4\pi r \cdot \int_0^{H/2} \left(\frac{1}{\eta} \right) \cdot z^2 \cdot dz}$ $V = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot H \cdot v_r$	Gradiente de Pressão $\left(-\frac{\partial p}{\partial x} \right) = \frac{V}{2B \cdot \int_0^{H/2} \left(\frac{1}{\eta} \right) \cdot y^2 \cdot dy}$ $V = B \cdot H \cdot v_x$	$\left(-\frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{2V}{\pi \cdot \int_0^R \left(\frac{1}{\eta} \right) \cdot r^3 \cdot dr}$ $V = \pi \cdot R^2 \cdot v_z$

Figura 31 - Soluções para geometrias elementares [19]

Ambos os métodos requerem o uso de computadores [19].

4.2. Métodos de Resolução das Equações

A necessidade de que o programa forneça, rapidamente, informações exatas sobre o escoamento da massa fundida no molde

é óbvia. A exatidão dos resultados, a velocidade dos cálculos e as áreas de utilização não dependem apenas da configuração do computador ou da estrutura do programa, mas também da escolha correta da metodologia de cálculo a ser adotada. Esta pode ser dividida em 3 tipos, conforme mostra a Figura 32, dependendo da complexidade das formas geométricas envolvidas. A seguir, será apresentada uma breve descrição dos métodos.

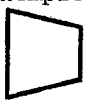
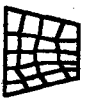


MÉTODO DE CÁLCULO	Exemplo 	Elementos Utilizados			Tempo de Processamento
		Tipo	Tamanho	Número	
Métodos Numéricos (Elementos finitos, Diferenças finitas, Volumes finitos, etc...)		Constante ou Variável	Variável	Variável	Minutos até Horas
Método Analítico		Constante	Constante	1 Elemento	Milisegundos
Método dos Segmentos Envoltos		Variável	Variável	Variável	Segundos

Figura 32 - Métodos empregados em programas de simulação reológica

4.2.1. Métodos Numéricos

Os programas baseados nos métodos numéricos partem do princípio de que a forma geométrica a ser avaliada está preenchida com uma série de elementos, normalmente de um único tipo (triangulares ou quadrangulares), formando uma malha. Diversos são os métodos numéricos, sendo o MEF (Método dos Elementos Finitos), o MDF (Método das Diferenças Finitas) e o

MVF (Método dos Volumes Finitos) os mais utilizados. O tipo de elemento é fixo, na maioria dos casos, para toda a geometria, enquanto que o tamanho do elemento pode variar em diferentes regiões da geometria. O cálculo será executado para cada elemento da malha. O tempo de processamento é dependente do número de elementos e pode variar, dependendo da velocidade de processamento, de alguns minutos até horas. A precisão do resultado depende do tipo e do número de elementos utilizados [16, 20, 80].

4.2.2. Método Analítico

Por este método a forma geométrica a ser analisada não é segmentada. O resultado é obtido por intermédio da resolução de equações analíticas para formas fixas pré-determinadas. A precisão e o tempo de obtenção do resultado independem da geometria analisada, mas sim, das equações adotadas. O tempo de processamento das equações fica, geralmente, na faixa de milissegundos. A forma geométrica fixa limita extremamente a área de utilização deste método. Programas baseados em cálculo analítico somente serão vantajosos quando uma mesma forma for repetida várias vezes e quando o número de formas diferentes não for muito elevado [16, 80].

4.2.3. Método dos Segmentos Envolto

Este método é a combinação da agregação de várias formas geométricas com o método do cálculo analítico. A geometria a ser

analisada é dividida em segmentos, de diferentes formas e tamanhos, que correspondam à formas pré-definidas. Os cálculos, no interior de cada elemento, são executados analiticamente e, às vezes, iterativamente. O resultado global é obtido pela associação dos resultados de cada segmento. O tempo necessário para atingir a solução final está em torno de alguns segundos [20, 80].

4.3. Simulação Bidimensional X Tridimensional do Fluxo do Plástico

Na avaliação de uma ferramenta de injeção busca-se também, além da representação qualitativa fornecida pelo resultado da simulação do preenchimento, informações quantitativas sobre pressões de enchimento, temperaturas do material, tempos de injeção, velocidades do fluxo e outras não menos importantes.

O cálculo destas grandezas baseia-se no resultado do processo de geração da trajetória do material através dos nós da malha de elementos finitos. O programa designa, para cada nó da estrutura da peça, um grau de importância. Este grau determina, quando da representação qualitativa, o instante em que a frente de onda atinge o respectivo nó, durante o preenchimento da cavidade, além de informar, a partir de quais nós o fluxo partiu no instante anterior. Estas informações estão contidas em um campo, denominado precedente, composto de nós de mesmo grau. Com base nestes dados, o cálculo será executado nas seguintes etapas:

1. A partir de determinados pontos, com a ajuda dos campos precedentes, é determinada a seqüência dos nós, pelos quais o material passa, até chegar ao ponto de entrada. Esta informação é armazenada como trajetória do fluxo. Os nós no final do fluxo apresentam o grau máximo atingido, sendo também os que apresentam a maior perda de pressão. As trajetórias, para que estes nós sejam alcançados, são denominadas de caminhos mais longos. A representação geométrica, por vezes, não mostra claramente qual é a trajetória mais longa. Para que os cálculos possam ser realizados, são selecionadas as trajetórias de todos os nós que estão no final do fluxo. Desta forma, é criada uma estrutura em árvore, que contém todos os nós da malha.

2. Para cada nó, de uma dada trajetória, é determinado o volume de material que passou por esta trajetória.

3. Adicionalmente, são necessários, para o cálculo, os seguintes dados de processo:

- temperatura do material;
- temperatura da parede da cavidade;
- fluxo de material e;
- dados do material (densidade, índice de fluidez, etc.).

A partir do volume de material determinado no passo 2, são calculados os volumes diferenciais para cada nó antecedente sobre a trajetória do fluxo. Com os valores da vazão e a da distância, é obtida a velocidade média. A partir dos valores de velocidade média, dados do material e parâmetros de processo, são determinadas as seguintes grandezas, para a trajetória do fluxo em questão:

- velocidade de cisalhamento;

- tensões internas;
- variação da temperatura por meio de dissipação;
- tempo de refrigeração (com temperatura de parede constante) e;
- perda de pressão (pela equação de Hagen-Poiseuille).

Podem ainda ser obtidos os seguintes valores para cada nó:

- temperatura média;
- pressão de injeção;
- tempo de fluxo e;
- comprimento da trajetória de fluxo;
- alteração da viscosidade (se utilizada a função de Carreau-WLF, encontrada em [19]).

Normalmente, as informações são fornecidas, pelos programas de simulação, em forma de tabelas. Os resultados gráficos são então apresentados, na tela do computador ou em papel impresso, através da representação de isolinhas (isocrônicas, isobáricas, isotérmicas, linhas de tensões de mesmo nível) e de vetores de velocidade [26].

Ao lado da possibilidade de se analisar o escoamento do plástico em uma cavidade (através da planificação da geometria, divisão desta em segmentos e posterior cálculo das grandezas procuradas) com a utilização de procedimentos de cálculo bidimensionais, apresenta-se a opção de simulação tridimensional, por meio da representação em casca da geometria da peça, inserção de uma malha de elementos finitos e resolução das equações intrínsecas.

A seguir são apresentadas estas duas formas de avaliação do escoamento de um material plástico no interior de uma cavidade.

4.3.1. Análise Bidimensional

A maneira mais simples de se avaliar e otimizar o escoamento do plástico, na cavidade de um molde para injeção de termoplásticos, é através do emprego de procedimentos de cálculo bidimensionais [19].

Esta forma de avaliação surgiu paralelamente à chegada das calculadoras programáveis, nas quais só era possível analisar uma geometria básica por vez. Todavia, o rápido desenvolvimento da informática, permitiu o melhor aproveitamento dos algoritmos existentes, os quais foram aperfeiçoados, a medida em que surgiam os computadores pessoais (tipo PCs), as estações de trabalho, os super-minis e os computadores de grande porte, possibilitando a análise de geometrias complexas, compostas de vários segmentos, em um tempo de processamento extremamente curto [19].

A utilização deste procedimento parte do princípio de que o projetista tenha realizado a planificação da geometria como descrito no capítulo anterior.

As geometrias básicas (segmentos) mais utilizadas para o método bidimensional são [19]:

- cilindros, para o sistema de alimentação;
- discos ou segmentos de discos e placas, para a peça.

Por fim, podem ser calculadas a pressão necessária para preencher a cavidade, o gradiente de pressão para cada segmento bem como a temperatura e as solicitações a que está sujeita a massa fundida, de maneira a avaliar se o material está se

comportando dentro dos limites admissíveis durante o processo de injeção.

Em princípio existem 4 métodos de cálculo bidimensional para avaliação dos canais de alimentação, os quais são apresentados em [67, 80].

Os principais programas bidimensionais existentes atualmente no mercado são o CADMOULD-2-D, MOLDFLOW-2-D, TMCONCEPT-2-D, OPTIFLOW, MICROPLAST-2-D, PROCOP-2-D, entre outros [19, 67, 80].

4.3.2. Análise Tridimensional

Como característica básica de uma simulação tridimensional tem-se a descrição da geometria da peça através de uma representação em casca, composta por elementos finitos, conforme descrito no item 4.1. O modelo em casca descreve o volume da peça. A espessura é definida apenas como um atributo físico, uma vez que a casca é obtida a partir da superfície média da geometria a ser analisada. Isto permite que sejam consideradas diferentes espessuras de parede durante a simulação. Esta simplificação força a considerar a simulação, por elementos finitos, como unidimensional [19, 67], embora a representação gráfica seja tridimensional. A transformação da geometria da peça, em um modelo em casca, implica na obtenção de superfícies médias. A Figura 33 apresenta o conceito de linha ou superfície média, adotado no modelamento de geometrias pelo procedimento de cascas.

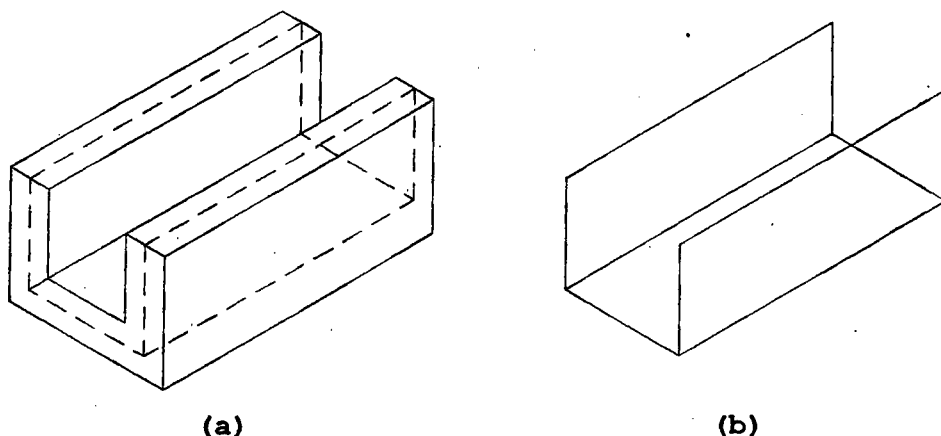


Figura 33 - Modelamento de geometrias: a) 3D volumétrico; b) 3D em casca

Sobre o modelo em casca (superfícies médias) é gerada a malha de elementos finitos para posterior análise.

Assim como para o método bidimensional, existem diversos programas comerciais baseados no conceito tridimensional de análise reológica, dentre os quais podem-se citar o MOLDFLOW-3-D, TMCONCEPT-FABEST, CADMOULD-MEFISTO, C-FLOW, MOLDFILL e PROCOP-3-D [19, 24, 80].

4.3.3. Vantagens e Limitações

As principais vantagens e limitações da análise reológica, realizada com programas tridimensionais (métodos numéricos) e com programas bidimensionais (métodos numéricos e da imagem de enchimento), segundo [18, 19, 26, 78], estão relacionadas a seguir:

Vantagens do 3D:

- Desnecessário planificar a geometria;
- Desnecessário construir as frentes de onda manualmente;
- Desnecessária a segmentação;

- Geometria da peça gerada apenas uma vez no computador; variações na posição do ponto de injeção e na espessura de parede podem ser executadas facilmente;
- Economia de tempo, se os dados geométricos do modelo em casca, gerados num CAD, puderem ser transferidos diretamente (CAD → CAE). A troca de dados, por intermédio de interfaces adequadas (IGES, VDA), permitirá que uma peça, já desenhada no modelador geométrico dos sistemas de projeto assistido por computador (CAD), seja transferida diretamente para o programa de simulação reológica;
- Informações sobre a posição das frentes de escoamento, pressão, temperatura, contração e tempo de preenchimento, são calculadas simultaneamente;
- Em caso de pontos de injeção múltiplos, o efeito, causado por alterações nos diâmetros dos canais do sistema de injeção, será diretamente visível;
- Maior precisão dos resultados;
- Após o modelo estar concluído, só será necessário determinar a(s) posição(ões) do(s) ponto(s) de injeção e, no final, analisar o(s) resultado(s), uma vez que todo o procedimento de cálculo será executado, automaticamente, pelo computador. Desta forma, é possível conseguir maior economia de tempo quando se deseja testar várias configurações diferentes de sistemas de injeção;
- Visualização do fluxo do plástico de forma mais adequada, mesmo em peças de formato complexo;
- Campos de pressão e velocidade podem ter representação visual simultânea em alguns programas;

Limitações do 3D:

- Necessidade de maior treinamento no manuseio do sistema;
- Modelamento da geometria é trabalhoso, principalmente, em peças de formato complexo;
- Elevado investimento em programas e equipamentos;
- Fixação do ponto de injeção em modelos 3D é, por vezes, difícil;
- Apresentação do resultado, algumas vezes, não é clara (deformada pela perspectiva);

Vantagens do 2D:

- Possibilidade de criação da imagem de enchimento, em prancheta de desenho, após um pequeno treinamento;
- Planificação da geometria apresenta realisticamente a verdadeira distância a percorrer;
- Planificação da geometria, às vezes, pode ser realizada rapidamente;
- Envolvimento com o método da imagem de enchimento desenvolve o sentimento para tomada de medidas reológicas sensatas;
- Baixo custo de programas 2D simplificados. Uma versão para PC custa por volta de US\$ 7.000,00;
- Pode ser utilizado como programa "stand-alone", inclusive quando ainda não há um sistema CAD implantado;
- Para peças simples, um projetista experiente pode chegar a um resultado satisfatório muito mais rapidamente que um com o processo tridimensional;

Limitações do 2D:

- Elevado gasto de tempo no caso de variações na posição do ponto de injeção e da espessura de parede;

- Para peças complexas, a planificação da geometria é bastante trabalhosa e, as vezes, impraticável.

4.4. Análise Térmica do Molde

A viabilidade econômica de um molde está intimamente relacionada com a sua capacidade de trocar calor com o material injetado. No processo de injeção de termoplásticos, a extração de calor da peça de plástico, pelo molde, deve ser tal que a peça atinja um estado sólido suficiente para possibilitar uma desmoldagem livre de deformações (tensões residuais). O tempo necessário para que esta situação seja alcançada define o tempo de resfriamento. A quantidade de calor a ser extraída depende da temperatura da massa fundida, da temperatura de desmoldagem (extração) e do calor específico do material. Em [19] encontra-se uma tabela, com os valores de temperatura de extração, para diversos materiais.

A retirada de calor do molde é feita pelo sistema de refrigeração, constituído por canais internos, por onde circula um líquido refrigerante, normalmente água, que transporta o calor para fora da ferramenta de injeção.

A qualidade da peça depende consideravelmente da homogeneidade da temperatura entre ciclos de injeção consecutivos. Portanto, o molde deve ser um bom trocador de calor para ser considerado economicamente viável [19]. A Figura 34 mostra, esquematicamente, as trocas de calor existentes em um molde para injeção de termoplásticos.

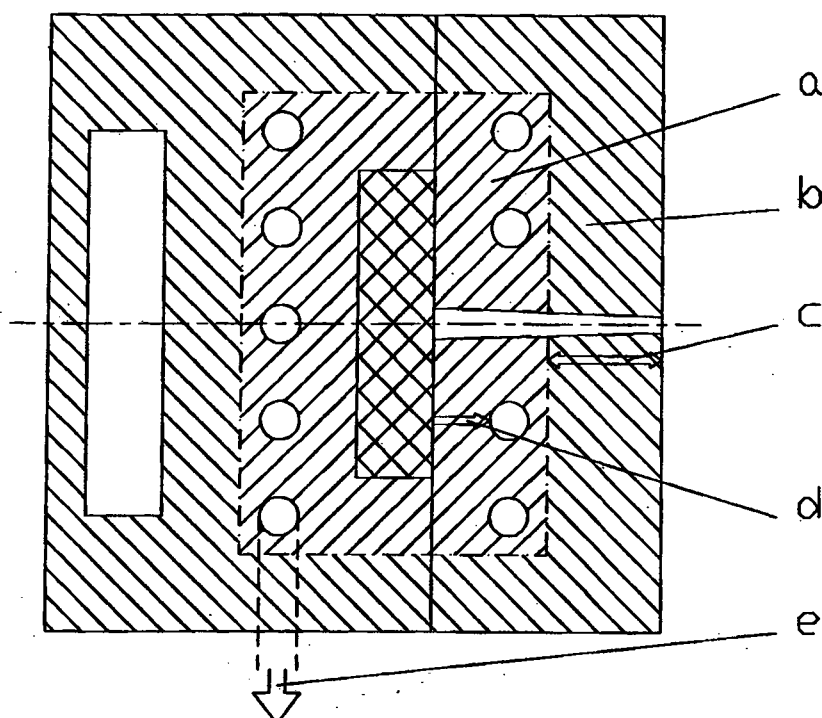


Figura 34 - Trocas térmicas em um molde: a) área de refrigeração; b) área de refrigeração ou aquecimento; c) troca de calor com o meio ambiente; d) troca de calor com a peça; e) troca de calor através do fluido de refrigeração [19]

Como o sistema de refrigeração influencia consideravelmente no tempo total do ciclo de injeção e na qualidade da peça, a avaliação térmica do molde não deve ser realizada apenas pela experiência do projetista [79]. Fórmulas para o tempo de resfriamento da peça são apresentadas em [3, 19, 84].

Alguns programas de simulação permitem que seja feita uma análise a partir da composição da avaliação reológica com a térmica. Nestes casos, o sistema de refrigeração é analisado em conjunto com os parâmetros de injeção, fornecendo resultados mais próximos da realidade. O Moldflow 6, o TMConcept e o I-DEAS possuem atualmente esta facilidade [85].

4.5. Análise Mecânica do Molde

As ferramentas de injeção são bastante solicitadas mecanicamente e só devem sofrer deformação elástica. Como a exigência em termos de precisão, das peças injetadas, é bastante elevada, as deformações sofridas pelo molde, durante o processo de injeção, devem ser consideradas, da mesma forma como o são as alterações sofridas pela contração do material, durante a fase de resfriamento da peça. Deformações acima dos limites permitidos podem acarretar em interferência no processo de injeção [19, 79]. Estas deformações podem causar variação nas medidas da peça final e, por vezes, penetração do material na linha de junta do molde, prejudicando a qualidade da peça produzida. Se as deformações do molde forem maiores que a contração do material, principalmente no sentido transversal à direção de extração, podem ocorrer problemas de agarramento da peça no momento da desmoldagem e dificuldade de abertura do molde, caracterizando um projeto inadequado da ferramenta de injeção. Assim sendo, a rigidez do molde determina a qualidade da peça e o nível de segurança da ferramenta de injeção. Partindo-se do princípio que um molde é composto de vários componentes, a união destes deve garantir a rigidez necessária.

Os programas de avaliação mecânica investigam a resistência à flexão e à compressão de moldes. Um programa comercial, desenvolvido na Alemanha para este fim, é o Moldmech [86]. Programas genéricos para análise do comportamento mecânico são, por exemplo, o Ansys e o Nastran [20].

C A P Í T U L O 5

5. PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA PARA APLICAÇÃO DA ANÁLISE REOLÓGICA ASSISTIDA POR COMPUTADOR

A filosofia básica dos programas de simulação do preenchimento de cavidades, consiste na utilização de um procedimento estruturado de projeto, baseado nos conceitos de escoamento de fluidos, para determinação de grandezas que surgem durante o processo de injeção [77].

Devido a uma forte pressão para reduzir os prazos de entrega, alguns usuários utilizam os programas de simulação reológica de forma desorganizada e sem muita lógica. Este fato pode levar a uma série de dúvidas quanto à credibilidade dos resultados obtidos. Além disso, é bastante provável que apenas parte de toda a potencialidade do programa estará sendo utilizada.

Para evitar isso, uma série de procedimentos preparatórios podem ser adotados, de forma a facilitar e acelerar o processo de análise reológica. A definição criteriosa do modelo geométrico e dos parâmetros de injeção, antes do início da simulação no computador, resultará, certamente, numa grande economia de tempo e de futuros retrabalhos.

Neste sentido, o presente capítulo objetiva apresentar uma proposta de metodologia para a execução da análise reológica de uma cavidade, utilizando programas computacionais. Deve ficar claro, no entanto, que variações na maneira de realização da

análise podem ser adotadas, a critério e necessidade de cada usuário.

5.1. Exame Visual da Geometria da Peça

O primeiro passo para a determinação da melhor forma de representação da geometria da peça é, sem dúvida, uma verificação detalhada e criteriosa do desenho do produto.

O modelo computacional ideal deve conter todas as informações necessárias a uma avaliação reológica adequada, podendo-se, no entanto, adotar medidas simplificativas que não comprometam a confiabilidade do resultado a ser obtido, reduzindo, com isto, o tempo de processamento final.

5.2. Seleção do Material e dos Parâmetros de Injeção

Nesta etapa deve ser especificado o material de que será produzida a peça. Para tanto, é feito um estudo das características reológicas do material a ser injetado, utilizando os módulos de seleção de material incluídos nos programas de simulação [44, 67] e/ou programas ou catálogos específicos para tal fim [13, 87, 88, 89, 90].

Estes programas acessam bancos de dados de materiais que contém informações tais como, código do fabricante e propriedades diversas dos materiais.

A Tabela 7 apresenta uma relação de alguns bancos de dados disponíveis no mercado internacional. Alguns são distribuídos gratuitamente por seus fornecedores, como, por exemplo, o EPOS e

o CAMPUS.

O CAMPUS (Computer Aided Material Preselection with Uniform Standards) foi desenvolvido na Alemanha, em 1988, por quatro fabricantes de polímeros (BASF, Bayer, Hoechst e Hüls), com o intuito de padronizar os ensaios dos materiais e, com isto, criar parâmetros comparativos entre os diversos plásticos [87].

Tabela 7 - Bancos de dados de materiais [66, 91, 92]

Nome Comercial	Empresa	Computador	Número de Materiais	Dados/Material	Acesso	Gráficos
Polymat	DKI	Grande Porte	6.000	~ 200	Modem/PC	-
Polymat PC	DKI	PC	6.000	40	Disquete	-
EDD	General Electric	Grande Porte	> 100	-	Modem/PC	Sim
Plaspec	Plastics Technology	Grande Porte	9.000	56	Modem/PC	-
Rheodat/Graph1	BASF	PC	~ 270	2	Disquete	Sim
RP3L	Rhone-Poulenc	PC	76	35	Disquete	-
CAPS	Polydata	PC	6.000	~ 100	Disquete	Sim
EPOS 90	ICI	PC	~ 600	max. 50	Disquete	Sim
Dacapo	Akzo	PC	121	19	Disquete	-
Plascams	Rapra Technology	PC	220	43	Disquete	-
CAMPUS Versão 2	22 fabric. polímeros	PC	varia por fabric. até 1000	40	Disquete	Sim
Thermfil	Thermofil	PC	~ 450	26	Disquete	-

Por ser utilizável em plataforma PC e apresentar os dados de forma padronizada para 22 fabricantes mundiais de polímeros (Tabela 8), o CAMPUS é largamente difundido na Europa.

Trata-se de um catálogo eletrônico que fornece informações sobre propriedades:

- mecânicas;
- térmicas;

- elétricas;
- óticas e;
- de processamento

dos materiais, além de algumas propriedades especiais e comportamento em relação à influências externas [87, 89]. Informações mais completas sobre as características do programa e os procedimentos de ensaios normalizados dos materiais podem ser encontradas em [89, 93].

Tabela 8 - Relação dos fornecedores do banco de dados CAMPUS [87]

Fabricante	País
Akzo Plastics B.V.	Holanda
Bakelite GmbH	Alemanha
BASF AG.	Alemanha
BAYER AG.	Alemanha
Bergmann GmbH & Co.	Alemanha
Ciba-Geigy Marienberg GmbH	Alemanha
Degussa AG.	Alemanha
Deutsche Solvay-Werke GmbH	Alemanha
Dow Vertriebsgesellschaft GmbH	Alemanha
DSM-Kunststoffen B.V.	Holanda
Du-Pont De Nemours GmbH	Alemanha
EMS-Chemie AG.	Suiça
Enimont Deutschland AG.	Tchecoslováquia
Exxon Chemical Internat. Marketing Inc.	Bélgica
General Electric Plastics Europe	Holanda
Himont Deutschland GmbH	Tchecoslováquia
Hoechst AG.	Alemanha
Hüls AG.	Alemanha
Monsanto Europe S.A.	Bélgica
Neste Oy Chemicals	Finlândia
Petrochemie Danubia GmbH	Áustria
Röhm GmbH	Alemanha

A grande maioria dos programas de seleção de materiais seguem o mesmo princípio do CAMPUS, permitindo a comparação das principais propriedades e a rápida escolha do material mais

adequado. Convém ressaltar que nem todos os materiais constantes das bases de dados podem ser encontrados no Brasil.

Também os programas para a otimização das condições de processamento, como o SIMPOL, são de grande utilidade [94].

O Anexo 1 apresenta a Tabela A1 com os parâmetros admissíveis mais importantes para diversos materiais termoplásticos.

5.3. Criação do Modelo Computacional

Em grande parte, as instalações CAD disponíveis nas indústrias de moldes são, ainda hoje, puramente bidimensionais e servem, de forma satisfatória, na substituição das antigas pranchetas de desenho, embora não sejam capazes de representar um modelo volumétrico [67].

Com a evolução dos computadores, os atuais modeladores sólidos conseguem representar um modelo tridimensional real.

Apesar de toda esta tecnologia, um modelo, para ser processado em programas de simulação reológica, deve ser definido com base na representação em casca, como visto no item 4.3.2 do capítulo anterior. Isto se deve ao fato de que não existe ainda, no mercado, um sistema que gere, automaticamente, a partir do modelo volumétrico, um modelo em casca, necessário posteriormente para geração da malha de elementos finitos [67].

Partindo do desenho da peça e/ou da análise visual, executada na etapa inicial, o projetista gera um modelo eletrônico no computador [26]. Pode ser utilizado o modelador do próprio programa de simulação ou um outro sistema CAD

compatível. A prática de utilização de outro programa de desenho é altamente recomendada quando há necessidade de uso intenso do simulador. A geração do modelo em outro equipamento libera o programa de simulação para a etapa de resolução dos cálculos, os quais exigem grande poder de processamento do computador.

5.3.1. Cavidade

Para o modelamento da geometria, normalmente, são executados os seguintes passos [18]:

- a) introdução das coordenadas tridimensionais dos principais pontos da geometria da peça, via teclado;
- b) interligação dos pontos, por meio de linhas retas;
- c) inserção de elementos circulares, se o modelador permitir;
- d) definição de superfícies através de áreas fechadas pelas linhas;

Para facilitar o trabalho, no caso de uma posterior alteração da geometria, estes passos devem ser registrados em formulários adequados. A Folha A1, em anexo, apresenta uma sugestão para o cadastramento dos pontos e superfícies da geometria.

A Figura 35 mostra o exemplo de modelamento da base de um engradado para garrafas.

O passo seguinte é a determinação das propriedades de cada superfície. São informados o tipo de superfície (placa ou cilindro) e os valores de espessura. Também aqui é interessante o registro das informações referentes a cada superfície, conforme sugere a Folha A2.

É conveniente o uso de modeladores geométricos com, no mínimo, recursos que permitam rotação, espelhamento e cópia da geometria ou de parte dela, além de um treinamento apropriado para aproveitamento de todos os recursos do sistema.

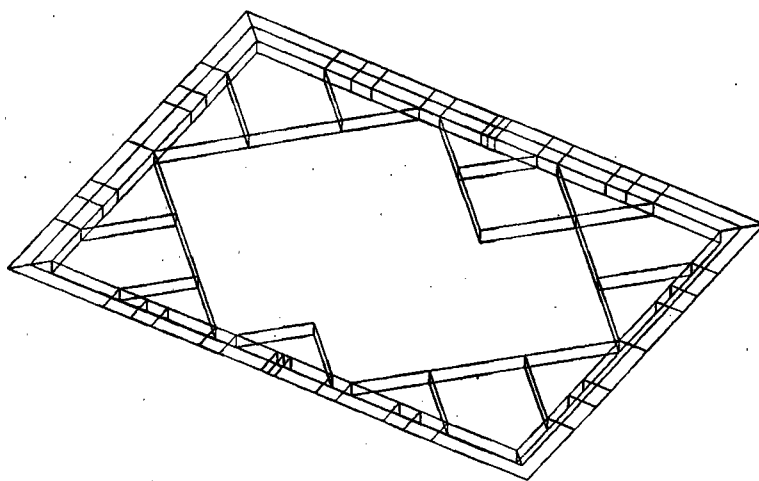


Figura 35 - Modelo parcial em casca da base de um engradado [95]

A grande maioria dos programas de simulação tem condições de importar um modelo gerado em outro sistema CAD, através da transferência por meio de um arquivo gráfico padrão (por exemplo: IGES, VDAFS, DXF) [18].

5.3.2. Canal de Alimentação

Da mesma forma como a cavidade, o canal de alimentação deve ser preparado para colocação da malha de elementos finitos. Para tanto, a trajetória do plástico, pelos canais de distribuição, deve ser representada por meio de segmentos de reta. Também neste caso é recomendada a documentação das informações pertinentes ao sistema de alimentação.

A Figura 36.a mostra como a configuração do canal de alimentação, para a cavidade do item anterior, é desenhada no modelador geométrico. Após a geração do modelo, define-se o tipo do canal (frio ou quente) e atribui-se os valores de espessura. A Figura 36.b exibe a representação teórica após a atribuição do diâmetro ao canal de distribuição.

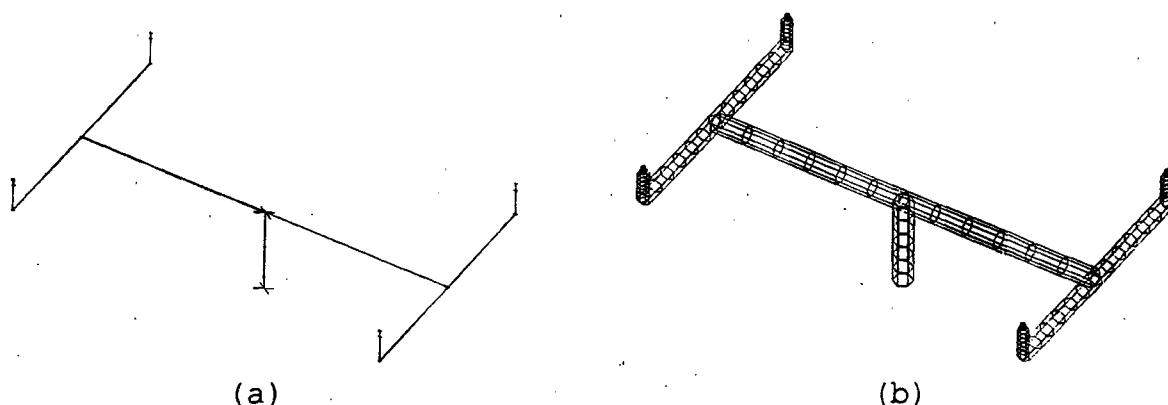


Figura 36 - Canal de alimentação para engradado: a) modelo para geração da malha; b) representação teórica das espessuras [95]

5.4. Geração da Malha sobre o Modelo

O modelo em casca, tanto da cavidade como do sistema de alimentação é, nesta etapa, recoberto com elementos finitos (triangulares e/ou quadrangulares) que definem uma malha.

A maioria dos sistemas CAE de simulação reológica trazem, incluído no pacote, um gerador de malhas para o modelador geométrico. O CADMOULD-Mefisto-PC, por exemplo, possui o módulo Mec-Prefem para gerar a estrutura da malha [18]. Alguns permitem ainda importá-la, já pronta, isto é, gerada em um outro programa, específico para este fim. Como exemplo, pode-se citar

a interface entre o programa de simulação Moldflow e o sistema CAD/CAM Duct 5, que possibilita a transferência da malha gerada neste último diretamente para o ambiente de trabalho do Moldflow. Comumente são necessários alguns ajustes* na malha transferida, o que gera um acréscimo no trabalho e, conseqüentemente, no tempo de definição dos elementos sobre a geometria.

Normalmente o processo de criação da malha, sobre a geometria da cavidade, segue as etapas descritas a seguir:

- 1) a partir dos pontos e linhas introduzidas no modelador, definem-se superfícies sobre a geometria da peça. Este passo é executado, se as superfícies não tiverem sido geradas durante a etapa de criação do modelo no módulo de CAD;
- 2) geração da malha, que pode ser realizada de duas formas distintas:

a) manualmente, particionando-se as linhas que definem a superfície, de forma a obter-se pontos sobre as mesmas. Estes pontos são então automaticamente interligados por linhas pelo computador, formando os elementos sobre a superfície selecionada (Figura 37.a);

b) automaticamente, fornecendo-se o tamanho desejado do elemento. O computador se encarregará de particionar a superfície, inserindo os elementos com o tamanho especificado (Figura 37.b).

O recurso de se utilizar as duas formas simultaneamente está presente na grande maioria dos programas.

O processo de geração da malha, sobre a geometria do

* Redimensionamento de elementos muito pequenos ou com relação altura/comprimento excessivamente grande.

sistema de alimentação, é muito semelhante. Apenas deve ficar claro que os canais não são compostos de superfícies, mas sim de linhas. Neste caso deve ser observada a regra da definição do tamanho de elemento para o sistema de alimentação, a qual especifica que este deve situar-se entre 3 e 5 vezes o diâmetro do canal [84].

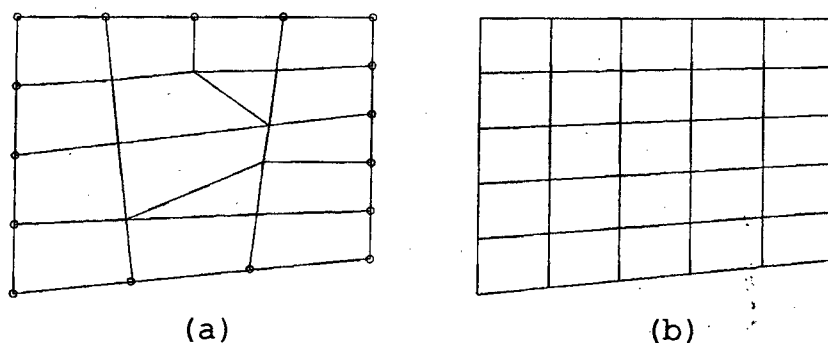


Figura 37 - Geração da malha de elementos finitos: a) manualmente; b) automaticamente

A caracterização da malha, sobre a geometria, é feita por números referentes aos nós e elementos, coordenadas dos nós de cada canto da geometria, informações sobre a conectividade (interligação com nós e elementos vizinhos) de cada nó e elemento bem como a espessura de cada elemento [26].

Nesta fase deve(m) ainda ser definido(s) o(s) nó(s) que servirá(ão) de ponto(s) de injeção. Os programas mais comuns normalmente permitem simular pontos de injeção únicos, múltiplos e/ou em leque.

O tempo necessário para criação da malha é dependente da facilidade de operação do gerador de malhas, todavia, situa-se na mesma ordem de grandeza do tempo requerido para a preparação da geometria (planificação, imagem de enchimento e segmentação) quando aplicado o método bidimensional [19].

5.5. Seleção dos Critérios de Simulação e Preparação dos Documentos de Registro

O processo de avaliação da ferramenta de injeção deve iniciar com a otimização da posição do ponto de injeção. O projetista, com as facilidades oferecidas pelo sistema, trabalha interativamente com o computador executando simulações para diferentes posições de injeção. Os objetivos, nesta fase, são evitar, se possível, a formação de linhas de solda em locais indesejados, eliminar bolsas de ar, além de tentar balancear as trajetórias do fluxo [18].

A partir do instante em que se obtém um escoamento adequado do material, parte-se para a otimização dos parâmetros de injeção, no sentido de obter a melhor distribuição possível de pressão, temperatura e tensão. Pode-se iniciar com a variação do tempo de injeção e temperatura do material [18, 67]. A seguir podem ainda ser alterados, nesta ordem, a temperatura do molde, espessuras de parede e, por fim, o material.

Para que o usuário não tenha que ficar esperando o processamento de cada análise, é interessante a preparação de um arquivo em lote, o qual processará sequencialmente o modelo desejado com várias situações distintas de parâmetros de injeção.

Uma boa documentação nesta fase garantirá economia no tempo de análise dos resultados. A Folha A3 sugere um formulário para anotação dos parâmetros iniciais de processo e dos resultados obtidos.

Para os casos em que a peça já se encontra em produção e o

objetivo é otimizar as condições de fabricação, é muito provável que se tenha de alterar alguns parâmetros geométricos da peça. As situações mais comuns encontradas na prática são as seguintes [96]:

- a) os pontos de injeção e a geometria da peça são fixos e só é permitida a alteração (forma, posição, dimensões) dos canais de alimentação;
- b) a geometria da peça é fixa, mas podem ser alterados os canais de alimentação e pontos de injeção e;
- c) a geometria da peça pode sofrer pequenas alterações, devendo ser definidos a quantidade, a forma, as dimensões e a posição dos pontos de injeção e dos canais de alimentação de forma a otimizar o preenchimento da cavidade.

Nestes casos, é de extrema importância a avaliação do custo/benefício das alterações propostas.

5.6. Simulação Propriamente Dita

Nesta fase será realizado o cálculo reológico dos parâmetros informados. O processo, conhecido como pré-processamento, envolve a resolução de algoritmos do programa, resultando na obtenção de valores para todos os nós da malha de elementos finitos.

Alguns programas oferecem ao usuário a possibilidade de calcular, inicialmente, apenas o fluxo da trajetória mais longa (crítica), com os parâmetros de injeção e os dados do material fornecidos, o que leva a reduzir o tempo de processamento. Este cálculo inicial é recomendado, pois, ao invés de calcular todas

as trajetórias do fluxo para a geometria em questão, pode-se verificar rapidamente, para uma única trajetória, se os parâmetros selecionados conseguirão satisfazer as necessidades de preenchimento e se os valores resultantes não cairão fora dos limites aceitáveis [67].

É natural que se espere uma solução de compromisso, buscando um ponto de equilíbrio entre o tempo de injeção e a perda de pressão na injeção. A Figura 38 mostra a curva que representa a pressão de injeção em função do tempo de injeção, onde fica bem clara a existência de um ponto de mínimo, caracterizando o instante de menor tempo de injeção para menor perda de pressão.

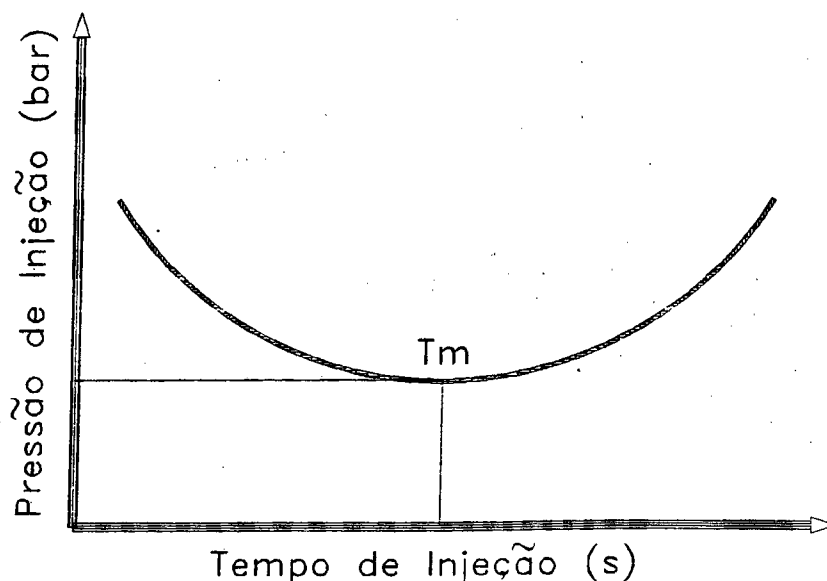


Figura 38 - Curva pressão X tempo de injeção [67]

5.7. Análise dos Resultados

A execução da simulação do processo de injeção tem como principais objetivos a obtenção de [26, 77, 96]:

- a) fluxo balanceado: todas as áreas do molde devem ser preenchidas de forma homogênea no tempo. Os percursos de escoamento do material devem apresentar comprimentos equivalentes a partir do(s) ponto(s) de injeção propiciando, assim, uma distribuição de pressão homogênea;
- b) fluxo unidirecional: a direção do fluxo não deve variar bruscamente;
- c) tempo uniforme de resfriamento da peça: a variação das temperaturas na cavidade não deve ser muito elevada;
- d) controle do calor gerado por atrito: o sistema de alimentação deve ser projetado de tal forma que o plástico também seja aquecido nos canais e entradas;
- e) linhas de solda localizadas em regiões não críticas da peça, ou seja, deve-se observar as exigências mecânicas e visuais de projeto;
- f) peças sem bolsas de ar;
- g) um nível de tensão residual mínimo;
- h) peças com o mínimo possível de deformação e;
- i) peças livres de marcas de rechupe.

Portanto, interessa ao projetista saber se, utilizando os parâmetros de injeção fornecidos e a posição selecionada para o ponto de injeção, os objetivos acima mencionados foram atingidos, de forma satisfatória, com a simulação.

Os resultados obtidos com a simulação são, normalmente, apresentados em forma de tabelas de dados ou visualmente, na tela do computador. Para sua interpretação e apresentação na tela, o sistema apoia-se em um programa, denominado de pós-processador. Sua função é representar na tela, o modelo

analisado, permitindo a visualização colorida de linhas de escoamento, ampliação de áreas específicas da peça (zoom), rotação da geometria, entre outros recursos [18].

É importante salientar que os resultados obtidos, com os programas de simulação, baseiam-se em métodos de cálculo aproximados, os quais representam o processo físico real de escoamento com maior ou menor fidelidade, dependendo, principalmente, da complexidade da geometria da cavidade. Isto significa que o resultado deve ser criteriosamente interpretado por um profissional com experiência na área de injeção [19, 25].

5.7.1. Interpretação das Linhas Isobáricas

As linhas isobáricas (pressão constante) exibem a distribuição de pressão na cavidade no instante do preenchimento. A direção do fluxo é, neste momento, normal à linha isobárica. No último ponto preenchido, o sistema assume que o valor da pressão é igual a zero. A Tabela 9 mostra os possíveis problemas detectados com a análise das linhas isobáricas e sugere algumas ações corretivas que podem ser adotadas.

5.7.2. Interpretação das Linhas Isocrônicas

As linhas isocrônicas (tempo constante) representam o material escoando no interior da cavidade durante o processo de preenchimento. A direção de escoamento do material é normal à linha isocrônica e a distância entre as linhas mostra o caminho percorrido para um determinado intervalo de tempo. Os possíveis

problemas detectados com a análise das linhas isocrônicas e algumas sugestões de medidas a serem adotadas estão expostas na Tabela 10.

Tabela 9 - Interpretação das isobáricas [97]

APRESENTAÇÃO DAS ISOBÁRICAS	SIGNIFICADO	PROVÁVEL CAUSA	MEDIDA CORRETIVA
Grande distância entre as linhas se comparado com outras áreas da cavidade	Pequena perda de carga	Seção da cavidade de fácil preenchimento devido: grande espessura de parede (material flui muito rápido; comparar com as isocrônicas)	.Reduzir espessura de parede da seção e reposicionar o ponto de injeção
		Seção preenchida antes que toda a cavidade o fosse (empacotamento, comparar com as isocrônicas)	.Reduzir espessura de parede da seção .Reposicionar ponto de injeção .Alterar forma da peça (cavidade)
Pequena distância entre as linhas se comparado com outras áreas da cavidade	Grande perda de carga	Seção da cavidade de difícil preenchimento devido: pequena espessura de parede (material reduz sua velocidade de escoamento ou cessa movimento; comparar com isocrônicas)	.Aumentar espessura de parede da seção .Reposicionar ponto de injeção .Alterar forma da peça (cavidade)

5.7.3. Interpretação das Linhas Isotérmicas

A distribuição de temperaturas, nas frentes de onda, é apresentada pelas linhas isotérmicas. A Tabela 11 mostra os possíveis problemas detectados com sua análise e sugere algumas medidas corretivas a serem adotadas. É importante salientar que as linhas isotérmicas correspondem às temperaturas de chegada em cada ponto, e não ao perfil instantâneo, durante o processo de injeção, pois, a medida que as várias áreas da cavidade vão sendo preenchidas, o material vai se solidificando.

Tabela 10 - Interpretação das isocrônicas [97]

APRESENTAÇÃO DAS ISOCRÔNICAS	SIGNIFICADO	PROVÁVEL CAUSA	MEDIDA CORRETIVA
Grande distância entre as linhas se comparado com outras áreas da cavidade	O material escoa mais rapidamente	.Grande espessura de parede .Temperatura muito alta .Velocidade elevada do material devido ao empacotamento ou redução do fluxo em outra área da cavidade	.Reduzir espessura de parede da seção .Diminuir temperatura do molde .Reposicionar ponto de injeção ou alterar forma da peça (cavidade)
Pequena distância entre as linhas se comparado com outras áreas da cavidade	O material escoa mais lentamente	.Pequena espessura de parede .Temperatura muito baixa .Redução do fluxo	.Aumentar espessura de parede da seção .Elevar temperatura do molde .Reposicionar ponto de injeção ou alterar forma da peça (cavidade)

Tabela 11 - Interpretação das isotérmicas [97]

APRESENTAÇÃO DAS ISOTÉRMICAS	SIGNIFICADO	PROVÁVEL CAUSA	MEDIDA CORRETIVA
Pequena Faixa de Grandes ou pequenas distâncias entre as linhas	Temperatura Distribuição homogênea de temperatura na cavidade	 Calor trocado com a parede igual ao calor gerado por atrito	 Problema resolvido; Checar isobáricas e isocrônicas
Grande Faixa de Grande distância entre as linhas se comparado com outras áreas da cavidade	Temperatura Queda ou aumento de temperatura homogêneos	 .Material flui facilmente (baixa viscosidade) .Material flui vagarosamente (baixo atrito)	 Problema resolvido; Verificar as condições de injeção
Pequena distância entre as linhas se comparado com outras áreas da cavidade	.Elevação abrupta de temperatura .Queda abrupta de temperatura	.Material flui rapidamente (grande atrito) .Fluxo do material estrangulado (elevada perda de pressão) .Material solidificado	.Aumentar espessura de parede da seção (facilitar fluxo) .Reposicionar ponto de injeção ou aumentar espessura de parede da seção .Reposicionar ponto de injeção ou aumentar espessura de parede da seção

Um perfil de temperatura ideal deve apresentar distribuição homogênea sobre toda a cavidade. Isto significa que o calor que flui para fora da cavidade deve ser compensado pelo calor gerado através do atrito do material com a parede.

5.7.4. Interpretação Simultânea das Isobáricas e Isocrônicas

Normalmente, um problema de preenchimento é detectado, com maior facilidade, quando se analisam as representações isobárica e isocrônica simultaneamente [97]. Problemas possíveis de serem detectados com a análise simultânea das linhas isobáricas e isocrônicas e algumas sugestões de medidas a serem adotadas estão expostas na Tabela 12.

Tabela 12 - Interpretação simultânea das isobáricas e isocrônicas [97]

APRESENTAÇÃO DAS ISOBÁRICAS E ISOCRÔNICAS	SIGNIFICADO	PROVÁVEL CAUSA	MEDIDA CORRETIVA
Perfis das linhas isobárica e isocrônica semelhantes	Direção do fluxo sem alteração durante o preenchimento da cavidade	Fluxo balanceado em todas as regiões da cavidade	Problema resolvido; Verificar pontos quentes e frios nas isotérmicas
Perfis das linhas isobáricas e isocrônicas com diferenças marcantes	Consideráveis alterações na direção do fluxo durante o preenchimento da cavidade	Fluxo desbalanceado em diferentes áreas da cavidade ocasionam: .falsas linhas de solda .bolsas de ar deslocadas .deformações devido a altas tensões internas geradas pelas diferentes orientações do fluxo	.Alterar espessuras de parede nas áreas críticas .Reposicionar ponto de injeção .Alterar forma da peça (cavidade)

Alguns programas (por exemplo, o Moldflow) têm a capacidade

de apresentar, em diferentes cores, os perfis isobárico e isocrônico, sobrepostos simultaneamente. Outros possibilitam a visualização das duas formas, uma ao lado da outra. Analisando os dois perfis, é possível verificar se são semelhantes, indicando, neste caso, um comportamento satisfatório do preenchimento da cavidade.

5.8. Regras para Otimização Reológica

A seguir serão relacionadas algumas regras práticas que devem ser levadas em consideração quando da tentativa de otimizar o comportamento do material no interior da cavidade analisada.

5.8.1. Das Condições de Moldagem

O primeiro passo consiste na otimização do tempo de preenchimento para uma dada temperatura do material e do molde. Uma situação ideal deve ser obtida, dentro de uma gama que esteja entre o preenchimento excessivamente rápido (causador de acréscimo da temperatura por atrito demasiado e de elevação da pressão de injeção) e o preenchimento muito lento (causador de grande queda de temperatura do material, por troca excessiva de calor com a parede, e de aumento da pressão de injeção) [97].

Por outro lado, se a taxa de injeção for muito alta, os níveis de tensão serão elevados na região de entrada. O inverso, isto é, taxa de injeção extremamente baixa, causará elevação do nível de tensão no final do fluxo, devido ao excessivo

resfriamento do material injetado. É desejável que a distribuição de temperatura seja homogênea em toda a cavidade, sendo, no entanto, uma condição favorável aquela em que haja aquecimento por atrito nos canais de alimentação.

Caso os níveis de pressão e tensão não fiquem dentro dos limites admissíveis, é necessário estudar outra combinação de temperaturas para o material e o molde. Normalmente, a variação da temperatura do material exerce maior influência, sobre o resultado obtido, do que uma variação equivalente da temperatura do molde [77, 97]. É comum aumentar, primeiramente, a temperatura do material, para tentar obter melhores condições de injeção [77]. Muitas vezes, o benefício mais importante de um aumento na temperatura do molde é a possibilidade de redução da taxa de injeção, sem que o material resfrie demasiadamente [97].

Os limites de temperatura do material são a temperatura de transição vítrea para termoplásticos amorfos e a temperatura de fusão cristalina para termoplásticos semi-cristalinos [67].

Se a temperatura do material estiver próxima de valores críticos, deverá ser tentado aumentar a temperatura do molde. O aumento da temperatura do molde permite reduzir os níveis de tensão e pressão de injeção, além de possibilitar uma taxa de injeção menor sem comprometer o nível de tensão no final do fluxo. A utilização de temperaturas do material injetado próximas do limite admissível permite alcançar baixos índices de tensão e pressão de injeção, além de resultar em canais de alimentação menores. Em contrapartida, o tempo de resfriamento é maior. O emprego de baixa temperatura do material propicia redução das marcas de rechupe, comprometendo, todavia, os níveis

de tensão. Se as marcas de rechupe forem o maior problema, deve ser estudada a possibilidade de inserção de mais pontos de entrada [77].

É importante observar se as seguintes condições estão sendo alcançadas [84]:

- a) A temperatura do material, no final do fluxo (T_{final}), deve estar em torno de 10 a 20°C abaixo da temperatura no início do fluxo (T_{inicial}), caso a espessura de parede for constante ao longo da trajetória do fluxo. Se a espessura, no final do fluxo, for consideravelmente menor que no início, $T_{\text{final}} \geq T_{\text{inicial}}$.
- b) O nível das tensões (σ_{inicial} e σ_{final}) deve ser mantido, dentro do possível, abaixo dos valores máximos permitidos e ser homogêneo durante todo o escoamento.
- c) Quando for permitido, reduzir o tempo de injeção de forma a obter o menor tempo de ciclo possível (t_{ciclo}).

Também a pressão de recalque tem influência na qualidade do produto final. Peças produzidas com uma alta pressão de recalque, mantida por um curto período de tempo, apresentam menor nível de tensões do que peças produzidas com baixa pressão de recalque e mantidas por um tempo maior [97].

5.8.2. Do Canal de Alimentação

- a) A perda de pressão no canal de alimentação deve estar abaixo de 400 bar [84].
- b) O tempo de resfriamento do canal de alimentação ($t_{\text{c canal}}$) deve obedecer, aproximadamente, as condições dadas pelas equações (18) e (19) [84], afim de garantir a atuação da pressão de

recalque.

$$t_c \text{ Canal} \geq i \cdot t_c \text{ Gate} \quad (18)$$

$$t_c \text{ Canal} \geq 0,8 \cdot t_c \text{ Peça} \quad (19)$$

onde

i = fator que leva em conta o diâmetro do ponto de injeção. Varia de 1 a 2,5. Deve ser de 2,5 para pequenos pontos de injeção, por exemplo 0,8mm e tender a 1 para pontos de injeção maiores.

c) O tempo de resfriamento do canal de alimentação deve ser obtido pela equação (20) [84] de modo a garantir a condição de extração do mesmo.

$$0,5 \cdot t_c \text{ Canal} \leq t_c \text{ Peça} \quad (20)$$

d) O acréscimo na temperatura do material, durante a fase de injeção, deve estar abaixo do valor máximo admissível.

e) O material restante no canal de alimentação deve ser o mínimo possível.

5.8.3. Do Ponto de Entrada ("Gate")

a) O tempo de resfriamento do ponto de injeção ($t_c \text{ Gate}$) deve ser suficientemente longo para permitir o recalque, conforme a equação (21) [84],

$$t_c \text{ Gate} \cdot i \geq (0,6 \text{ a } 0,8) \cdot t_c \text{ Peça} \quad (21)$$

- b) A taxa de cisalhamento deve estar situada abaixo dos valores críticos.
- c) A perda de pressão deve ser inferior a 50 bar na entrada ("gate") [84].

5.8.4. Da Cavidade

- a) A pressão de injeção, para o canal de alimentação e para a cavidade, deve ser menor do que os valores máximos permitidos (800 a 1400 bar) [4, 84].
- b) A distribuição de pressão, dentro da cavidade, deve ser homogênea ao longo de diferentes trajetórias (esta condição deverá ser atendida, dentro do possível, automaticamente). A verificação deve ser feita no módulo de visualização da pressão.
- c) O percentual de camadas solidificadas ao final da injeção deve estar em torno de 5%, sendo admissível um máximo de 10% [95].
- d) A faixa de variação da temperatura, dentro da cavidade, não deve ser maior do que 10°C e, dentro do possível, as linhas isotérmicas devem manter a mesma distância entre si [97].

5.9. Considerações sobre Empenamento

Se uma região apresentar contração diferenciada de outra, ocorrerá o empenamento da peça de plástico. As causas para o aparecimento deste efeito são [28, 29, 77, 98, 99]:

- a) diferenças de orientação do fluxo: em geral, a contração é maior em materiais orientados do que em não orientados. O

exemplo clássico de empenamento, devido a orientação diferencial, é representado por uma peça com injeção no centro, como mostra a Figura 39. A contração na diagonal é maior do que na direção dos lados, gerando forças de tração na diagonal, o que faz com que os cantos sejam torcidos, para cima ou para baixo.

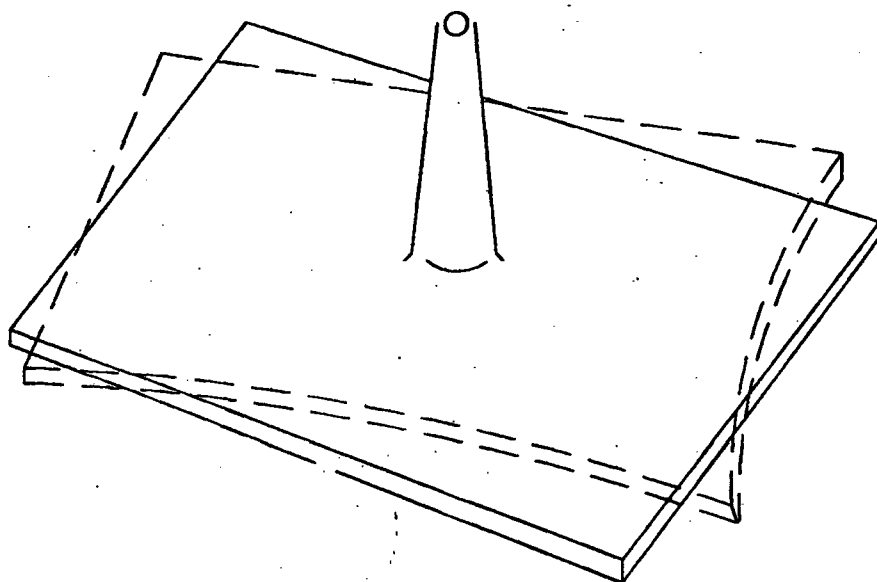


Figura 39 - Empenamento gerado por orientação do fluxo em placa com injeção central [77]

b) diferenças de cristalinidade: ocorre somente para materiais cristalinos. Se uma parte da peça apresentar taxa de resfriamento mais lenta, esta área terá configuração altamente cristalina, portanto, grande contração. A variação na taxa de resfriamento pode ocorrer em áreas mais espessas da peça. A Figura 40 mostra a variação de espessura como causa de um provável empenamento, devido a diferença de cristalinidade no interior da peça.

c) diferenças de resfriamento: considere um disco de plástico

colocado dentro de uma cavidade circular, como mostra a Figura 41.

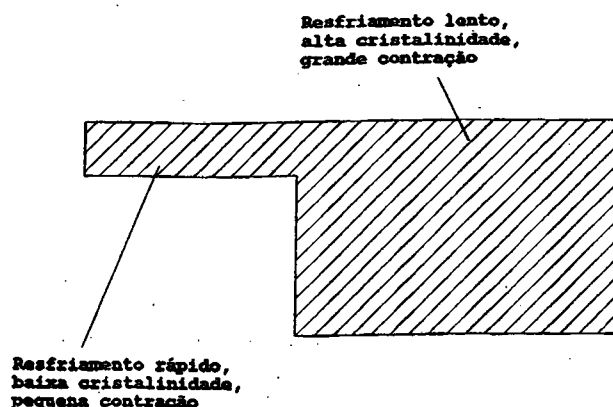


Figura 40 - Configuração causadora de empenamento por variação da cristalinidade [77]

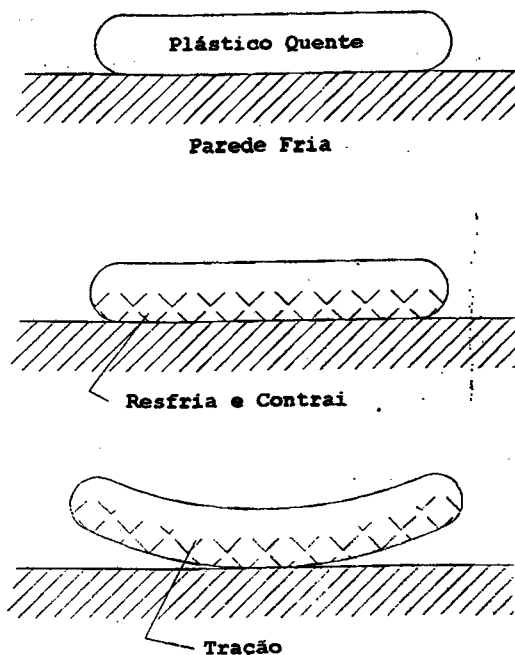


Figura 41 - Empenamento por resfriamento diferenciado [77]

O plástico, em contato com a superfície fria do molde, resfria e contrai. Enquanto a camada inferior contrai, há um escorregamento sob a camada superior que permanece mole. Posteriormente, a camada superior resfria e contrai. Pelo fato de estar presa à camada inferior, durante o resfriamento, não há

condições de escorregamento. Assim, esta contração resultará em tensão na camada superior, fazendo com que a peça empene.

O efeito de empenamento por resfriamento diferenciado ocorre quando uma região da peça resfria mais rapidamente que outra ou quando as superfícies do molde estão à temperaturas diferentes. Normalmente, a causa é um projeto de refrigeração deficiente.

C A P Í T U L O 6

6. ESTUDO DE CASO PRÁTICO

Para exemplificar a aplicação do método computacional, na avaliação de uma peça de plástico, tornou-se necessário o estudo de um caso prático.

A partir da necessidade, apresentada por um fabricante alemão, de otimizar o processo de injeção de uma peça, denominada **escaninho para papel**, foi realizado um estudo completo do comportamento do material na cavidade, sendo sugeridas alterações para melhorar o desempenho do molde durante a injeção.

O caso prático, submetido à dois programas comerciais de simulação reológica, é descrito a seguir.

6.1.. Seleção dos Programas de Simulação Reológica

A seleção foi baseada na disponibilidade dos programas de simulação para a realização dos testes. Os programas escolhidos foram o TMConcept, da Plastics & Computers, Itália, disponível no SKZ - Süddeutsches Kunststoff-Zentrum e o Moldflow, da Moldflow Pty., Austrália, instalado no GRUCON - Grupo de Pesquisa e Treinamento em Comando Numérico e Automatização Industrial.

O TMConcept e o Moldflow permitem analisar graficamente o fluxo do polímero no interior do molde, objetivando otimizar o

sistema de alimentação, a cavidade, o material a ser utilizado e os parâmetros de injeção, para as fases de enchimento e recalque do ciclo de moldagem [11, 30, 96, 100, 101, 102].

6.1.1. Programa TMConcept

O TMConcept (Total Molding Concept) é um pacote computacional composto de módulos (programas), que podem ser adaptados às necessidades de cada usuário. O sistema completo engloba [100]:

- MS - seleção de material;
- MCO - análise de custos de produção;
- FA - análise de enchimento;
- CSE - análise da contração e;
- MTA - refrigeração do molde.

O banco de dados (MS) contém informações reológicas sobre polímeros de vários fornecedores. Juntamente com o programa de análise de enchimento, que tem como função auxiliar o projetista na determinação do sistema de alimentação, dá cavidade e dos parâmetros de injeção mais favoráveis, é fornecido o modelador, para definição da geometria a ser analisada. O módulo FA abrange os sub-programas faBest (análise do preenchimento da cavidade), faMesh (modelador de elementos finitos) e faIso (pós-processador para visualização gráfica dos resultados). Dependendo da capacidade de processamento do computador e do número de elementos da malha, uma simulação pode durar de minutos até horas.

No SKZ, o TMConcept utiliza plataforma computacional PC 386

40 MHz, com co-processador aritmético.

6.1.2. Programa Moldflow

O MF/Flow é um módulo do sistema Moldflow e compõem-se de uma base de dados reológicos, um programa para desenho, um gerador de malha de elementos finitos e um programa de resolução dos métodos numéricos (simulador).

Na base de dados, denominada de MADRAS, está armazenada uma vasta gama de informações a respeito de matérias-primas, de diversos fornecedores de polímeros. O programa de desenho serve para modelar a geometria em um formato diretamente acessível pelo programa de geração da malha de elementos finitos. O modelo é gerado na forma de arame ("wireframe"). O Moldflow tem condições de importar desenhos gerados em vários programas CAD comerciais [12]. Para a simulação, o módulo MF/Flow permite duas opções de análise: a 2D e a 3D. Por análise 2D é entendida uma simulação rápida, apenas para determinação da temperatura e tempo de injeção mais adequados. A geometria da peça é planificada e definida como um conjunto de seções de forma simples (placa, disco, cilindro), como visto no capítulo 4. A análise 3D permite a determinação de informações detalhadas sobre o que acontece durante o processo de moldagem, possibilitando, ainda, a visualização gráfica tridimensional do resultado. Da mesma forma que no TMConcept, o tempo de resposta é dependente da capacidade de processamento do equipamento e da precisão desejada (número de elementos).

O MF/Flow pode ainda ser integrado a três outros produtos

da Moldflow [102]:

- o MF/Cool, para análise dos efeitos do resfriamento;
- o MF/Warp, para verificação da contração e eventual empenamento e;
- o MF/Stress, para avaliação da performance estrutural da peça.

No GRUCON, o Moldflow está instalado em uma estação de trabalho ("workstation") Sun SparcStation II+.

O Moldflow tem performance bastante superior ao TMConcept, motivado pela configuração computacional mais poderosa. Por outro lado, apresenta um custo cerca de 4 vezes maior.

6.2. Metodologia Utilizada

Os procedimentos desta análise reológica foram baseados na metodologia proposta no capítulo anterior. A partir das necessidades do fabricante da peça, foram executadas simulações, com diferentes configurações do sistema de alimentação e parâmetros de injeção. Após a obtenção dos melhores parâmetros com o material indicado pelo fabricante, estudou-se uma solução com outro material. Todo o processo foi desenvolvido, inicialmente, no TMConcept. A partir dos resultados finais obtidos, foi executada uma simulação no programa Moldflow, como forma de comparar os dois sistemas.

6.3. Caso Prático: Escaninho para Papel

A peça a ser analisada é um escaninho para papel. Tal produto pode ser encontrado em escritórios e sua função

principal é o armazenamento de papéis em circulação. A peça está sendo comercializada há alguns anos e o fabricante solicitou a análise reológica com o objetivo de otimizar o processo de fabricação.

6.3.1. Solicitação de Otimização

O principal ponto a ser atacado é o custo de fabricação da peça escaninho. Devem ser verificadas as possibilidades de utilização de uma máquina de injeção menor e de redução do peso do produto.

O emprego de uma máquina com menor capacidade de injeção implica na minimização da pressão de injeção. Para que se obtenha a menor pressão de injeção possível, devem ser otimizados:

- a) o sistema de alimentação, em especial a posição do ponto de injeção;
- b) os parâmetros de processamento, isto é, temperaturas e tempos de injeção e;
- c) o material.

Para a redução do peso do produto, deve ser obtida a melhor combinação entre:

- a) material e;
- b) espessura de parede.

O fabricante solicitou ainda que não fossem feitas grandes alterações no molde, isto é, evitar a modificação da cavidade.

O reposicionamento do ponto de injeção, a variação dos parâmetros de injeção e, talvez, a substituição do material foram propostas aceitas pelo fabricante.

6.3.2. Informações Iniciais

Os parâmetros de injeção, utilizados pelo fabricante do escaninho, foram coletados, como mostra a Tabela 13, e serviram de valores de partida para a análise reológica.

Tabela 13 - Dados fornecidos pelo fabricante do escaninho

Parâmetros de Injeção para Material : Poliestireno - Vestyron V214 Fabricante: Hüls	Valor
Temperatura de injeção	240,0 °C
Temperatura do molde	40,0 °C
Tempo de injeção	3,0 s
Pressão de injeção	503 bar (50,3 MPa)

A Tabela 14 apresenta algumas propriedades do material Hüls Vestyron V214/PS, extraídas do banco de dados CAMPUS.

Tabela 14 - Dados técnicos do material Hüls V214 [89]

PROPRIEDADES	VALOR
Mecânicas	
Densidade (23°C e 50% umidade relativa)	1,04 g/ml
Trabalhabilidade	
MVI à 200°C/5kg	7,0 ml/10 min
Viscosidade	100 ml/g
Avaliação Reológica	
Densidade (temperatura de processamento)	0,94 g/ml
Condutibilidade térmica	0,14 W/m.K
Temperatura de imobilização	140 °C
Temperatura de congelamento	105 °C
Condições de Ensaio	
Temperatura da massa plástica	230 °C
Temperatura do molde	40 °C
Velocidade do escoamento	80 mm/s

O desenho da peça a ser analisada é apresentado na Figura 42.

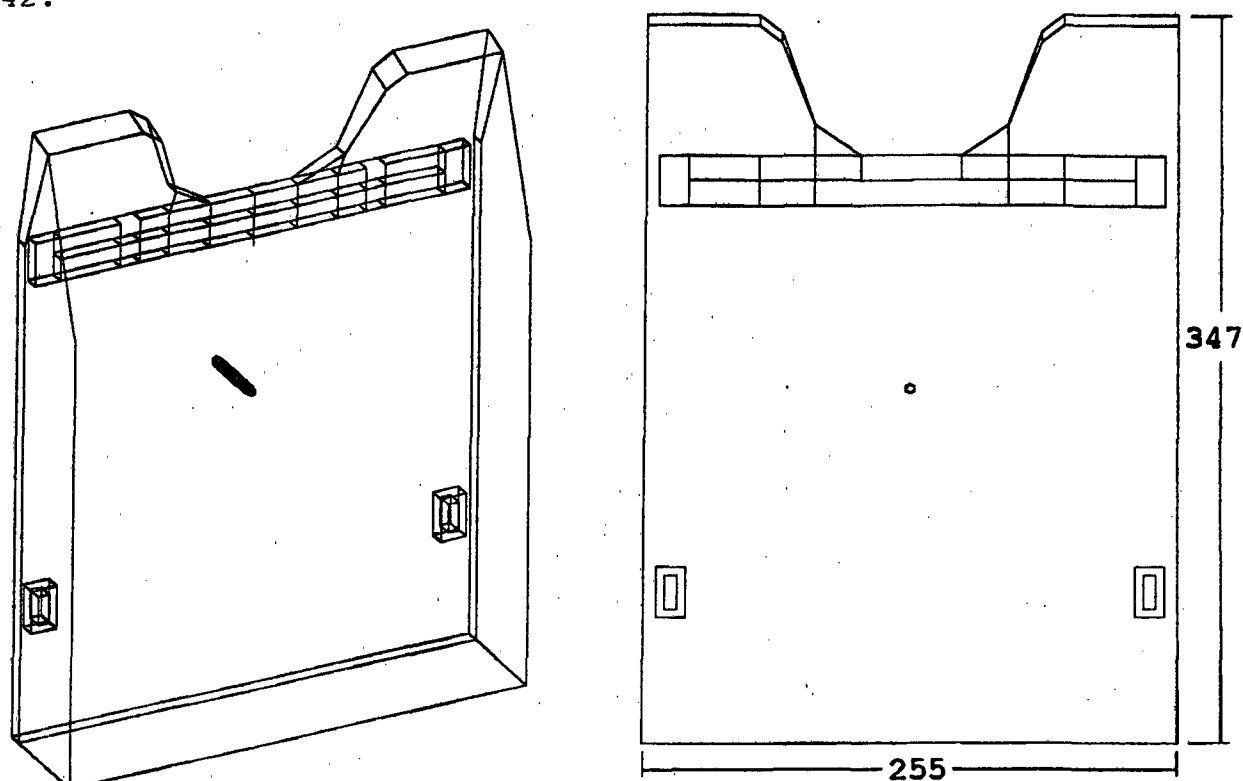


Figura 42 - Desenho do produto: escaninho

6.3.3. Análise da Peça Original

O primeiro passo adotado foi a análise visual da peça original. Esta etapa consistiu também de medição das espessuras de parede, como forma de conferir a precisão das dimensões da peça. Para facilitar a geração do modelo no CAD, foram assumidas algumas simplificações que não devem comprometer os resultados da análise:

- a) os arredondamentos de canto, altamente desejáveis na peça de plástico, foram desconsiderados;
- b) segundo o projeto, os quatro pés da peça tem espessura igual a 2,0 mm; adotou-se o valor de 1,85 mm, uma vez que o volume de

material nesta região é bastante pequeno e sua influência na pressão de injeção será mínima.

A partir destas informações e das dimensões geométricas, fornecidas pelo fabricante, foi gerado o modelo computacional da peça. Para tanto utilizou-se o programa AutoCAD, versão 10.0, rodando em plataforma PC 386/40. O programa oferece recursos de modelamento mais poderosos que o modelador do TMConcept. Um exemplo é a falta de funções de espelhamento e aparamento ("trim") neste último. Devido à requisitos do gerador de malhas do TMConcept, as superfícies modeladas devem ser, sempre, tetraédricas. Desta forma, um círculo contido em uma superfície deve ser adaptado, por meio de segmentos de reta, de tal modo que seja criado um tetraedro, como mostra a Figura 43.

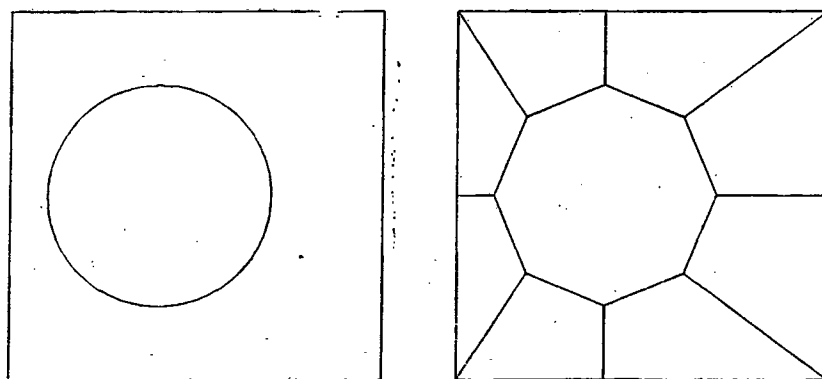


Figura 43 - Adaptação de superfícies

Objetivando reduzir o tempo de modelamento e aproveitando a simetria, gerou-se apenas uma metade da peça e, em seguida, com o comando de espelhamento, completou-se a geometria. Na Tabela 15 estão registrados o tempo de modelamento e os equipamentos utilizados para a geração do modelo eletrônico. A Figura 44 apresenta a forma final do modelo geométrico, transferido,

posteriormente, ao programa TMConcept, por meio do formato IGES. No módulo de geração da malha de elementos finitos do TMConcept não foram detectados problemas (por exemplo, elementos muito pequenos, grande relação L/H).

Tabela 15 - Tempos e equipamentos para geração do modelo computacional [103]

	Programa	Computador	Tempo
Geração da Geometria	AutoCAD 10.0	IBM PC PS2/Modell 80	16,0 h
Transferência da Geometria	AutoCAD 10.0 → TMC via IGES	PS2/Modell 80 → ACER 1100/33 386	7 min
Determinação das Superfícies.	TMConcept	ACER 1100/33 386	6,0 h
Geração da Malha	TMConcept	ACER 1100/33 386	3 min
Total	-	-	22,2 h

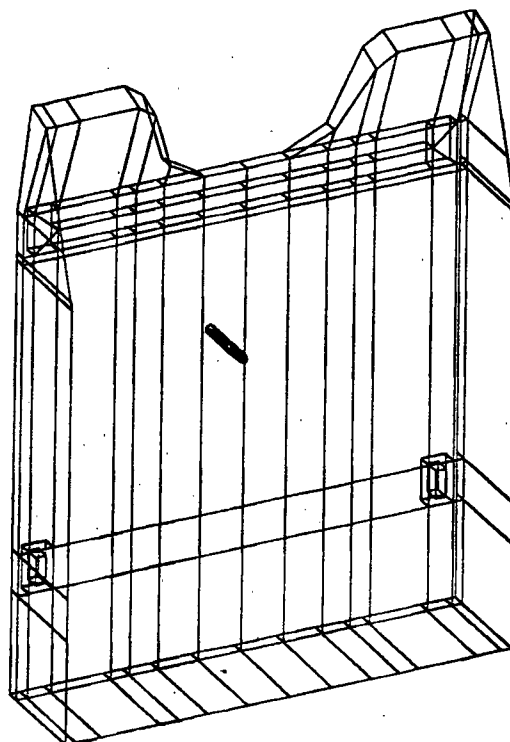


Figura 44 - Modelo de escaninho para papel gerado no AutoCAD [103]

A primeira simulação foi realizada com o material e os parâmetros utilizados até o momento pelo fabricante. Os resultados estão apresentados na Tabela 16 e a Figura 45 mostra um gráfico comparativo entre a pressão utilizada na prática e a obtida na simulação. O tempo de processamento durou cerca de 2 horas.

Tabela 16 - Resultados da análise com parâmetros de injeção fornecidos pelo fabricante da peça

Material	PS V214 - Hüls
Temperatura da massa plástica	240 °C
Temperatura do molde	40 °C
Tempo de injeção	3,0 s
Espessura da parede	1,85 mm
Posição do ponto de injeção	175 mm da base
Diâmetro do ponto de injeção	4,0 mm
Volume total de injeção	279,3 cm ³
Vazão volumétrica	93,1 cm ³ /s
Área projetada	814,0 cm ²
PRESSÃO DE INJEÇÃO	548 bar (54,8 MPa)
FORÇA DE FECHAMENTO	380 ton
TEMPERATURA MÁXIMA ATINGIDA	251 °C
TEMPO DE RESFRIAMENTO	27,6 s
CAMADA SOLIDIFICADA	5,0 %

A diferença de 8,95% a mais na pressão calculada pela simulação, em relação à fornecida pelo fabricante, deve-se, principalmente, ao fato de que as espessuras de parede da peça, medidas previamente, apresentavam valores em torno de 2 mm, enquanto que o projeto especifica 1,85 mm.

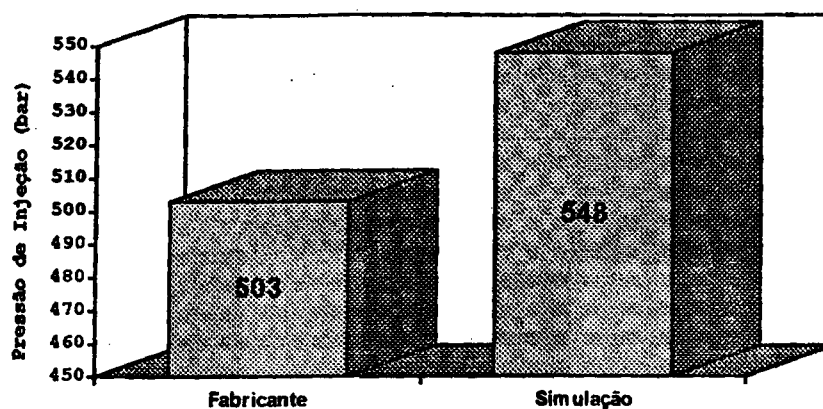


Figura 45 - Pressão de injeção utilizada pelo fabricante e obtida na simulação

6.3.4. Otimização do Ponto de Injeção

Inicialmente, seguindo a metodologia proposta, tentou-se encontrar o melhor posicionamento possível do ponto de injeção. A Figura 46 apresenta três variações da localização do ponto de injeção, as quais foram simuladas com o mesmo material e condições de injeção.

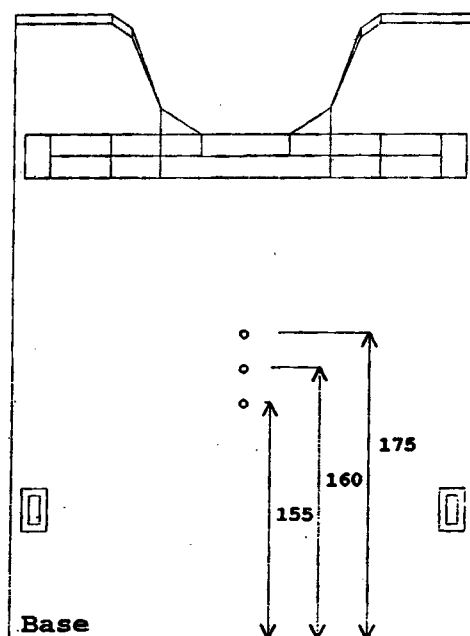


Figura 46 - Variações no posicionamento do ponto de injeção

Pelo resultado obtido, mostrado na Tabela 17 e pela Figura 47, pode-se verificar que a posição mais favorável, do ponto de injeção, é a de 155 mm a partir da base do escaninho. Verificou-se também que, a partir deste ponto, o preenchimento da cavidade é mais homogêneo, não ocorrendo empacotamento, efeito este que aparecia na peça original.

Tabela 17 - Resultados da análise com variação da posição do ponto de injeção (Material PS V214/Hüls)

Posição do ponto de injeção	175 mm	160 mm	155 mm
Temperat. da massa plástica	240 °C	240 °C	240 °C
Temperat. do molde	40 °C	40 °C	40 °C
Tempo de injeção	3,0 s	3,0 s	3,0 s
Espessura da parede	1,85 mm	1,85 mm	1,85 mm
Diâmet. do ponto de injeção	4,0 mm	4,0 mm	4,0 mm
Volume total de injeção	279,3 cm ³	279,3 cm ³	279,3 cm ³
Vazão volumétrica	93,1 cm ³ /s	93,1 cm ³ /s	93,1 cm ³ /s
Área projetada	814,0 cm ²	814,0 cm ²	814,0 cm ²
PRESSÃO DE INJEÇÃO	548 bar (54,8 MPa)	409 bar (40,9 MPa)	397 bar (39,7 MPa)
FORÇA DE FECHAMENTO	380 ton	267 ton	259 ton
TEMPERATURA MÁXIMA ATINGIDA	251 °C	248 °C	250 °C
TEMPO DE RESFRIAMENTO	27,6 s	16,5 s	16,6 s
CAMADA SOLIDIFICADA	5,0 %	5,1%	5,0 %

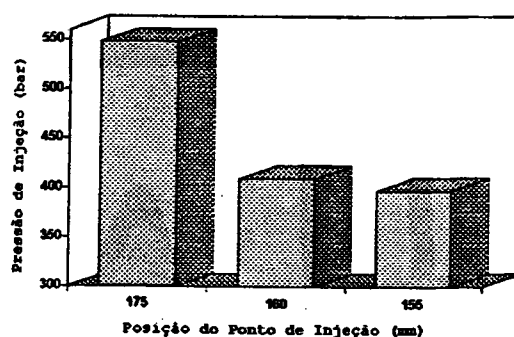
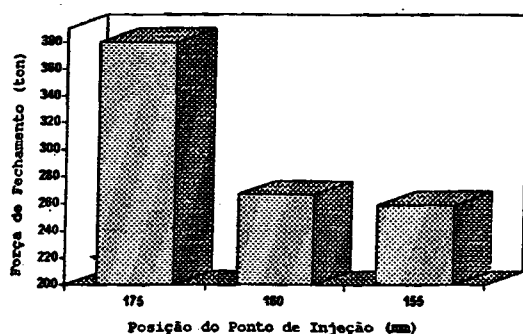


Figura 47 - Força de fechamento e pressão de injeção em função da posição do ponto de injeção

6.3.5. Otimização das Condições de Injeção

Nesta fase foram variadas algumas condições de injeção, a saber:

- o tempo de injeção teve valores de 2, 3 e 5 segundos;
- a temperatura da massa plástica foi acrescida em 10 °C, passando para 250 °C e;
- o diâmetro do ponto de injeção foi testado para valores de 1,8 e 4 mm. A redução do diâmetro visa conseguir elevação da temperatura do plástico quando este entrar na cavidade. Isto permitiria uma maior homogeneidade no preenchimento.

A Tabela 18 e a Figura 48 apresentam os resultados destas simulações, devendo-se notar a grande variação na pressão devido aos diferentes tempos de injeção.

Tabela 18 - Resultados da análise com variação do tempo de injeção, da temperatura do plástico e do diâmetro do ponto de injeção (Material PS V214/Hüls)

Temper. plástico (°C)	250	250	250	250	250	250
Temper. do molde (°C)	40	40	40	40	40	40
Tempo de injeção (s)	5,0	5,0	3,0	3,0	2,0	2,0
Espessura parede (mm)	1,85	1,85	1,85	1,85	1,85	1,85
Diâmet. ponto injeção (mm)	1,8	4,0	1,8	4,0	1,8	4,0
Volume total injeção (cm ³)	279,3	279,3	279,3	279,3	279,3	279,3
Vazão volumétrica (cm ³ /s)	55,9	55,9	93,1	93,1	139,6	139,6
Área projetada (cm ²)	814,0	814,0	814,0	814,0	814,0	814,0
PRESSÃO INJEÇÃO (bar/MPa)	373/ 37,3	357/ 35,7	415/ 41,5	397/ 39,7	434/ 43,4	408/ 40,8
FORÇA DE FECHAMENTO (ton)	245	232	259	249	266	253
TEMPER. MÁX. ATINGIDA (°C)	250	250	252	250	255	252
TEMPO DE RESFRIAMENTO (s)	16,5	16,5	16,9	16,5	16,9	16,9
CAMADA SOLIDIFICADA (%)	6,3	6,4	5,0	5,0	3,9	3,8

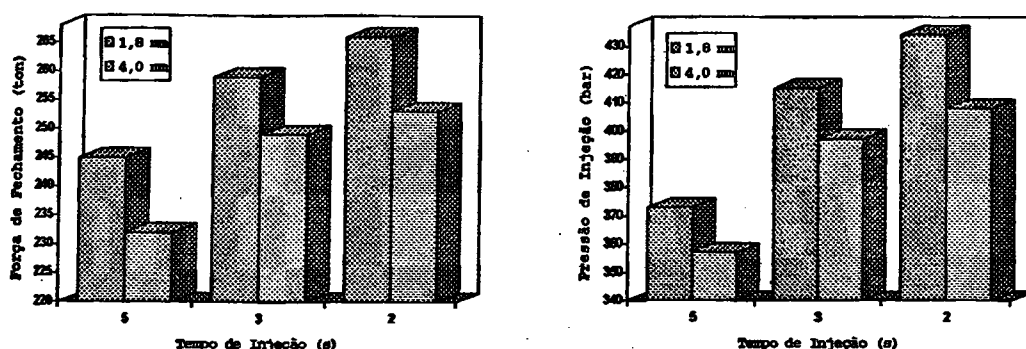


Figura 48 - Força de fechamento e pressão de injeção em função do tempo de injeção e diâmetro do ponto de entrada

A simulação, com tempo de 5 segundos e temperatura do plástico igual a 250 °C, proporciona menor pressão de injeção, embora exija um tempo de ciclo maior. A redução conseguida atinge cerca de 10%, valor considerável quando considerados os custos da máquina de injeção. A temperatura máxima atingida continua dentro do valor admissível (280 °C) para todas as simulações. A camada solidificada cresceu para 6,4%, pouco acima do recomendado, mas ainda na faixa aceitável (< 10%). A tentativa de variação do diâmetro do ponto de injeção não trouxe grandes benefícios, além de a pressão ter se elevado em 4,5%.

6.3.6. Otimização do Material

Um mesmo material, neste caso o poliestireno, pode ter diferentes características técnicas. Os fabricantes de matéria-prima fornecem variações do material indicadas por códigos. Com o auxílio de catálogos, é possível selecionar-se um mesmo material com pequenas variações de propriedades.

Foram selecionados, para esta experiência, três variações

do poliestireno. A Tabela 19 apresenta os materiais selecionados com seus respectivos valores característicos, obtidos a partir do programa CAMPUS.

Tabela 19 - Dados técnicos dos materiais selecionados. (Fabricante Hüls) [89]

PROPRIEDADES	V214	V314	V325
Mecânicas			
Densidade (g/ml)	1,04	1,04	1,04
Trabalhabilidade			
MVI à 200°C/5kg (ml/10 min)	7,0	16,0	23,0
Viscosidade (ml/g)	100	90	75
Avaliação Reológica			
Densidade da massa plástica (g/ml)	0,94	0,94	0,94
Condutibilidade térmica (W/mK)	0,14	0,14	0,14
Temperatura de imobilização (°C)	140	140	140
Temperatura de congelamento (°C)	105	100	95
Condições de Ensaio			
Temperatura da massa plástica (°C)	230	230	230
Temperatura do molde (°C)	40	40	40
Velocidade do escoamento (mm/s)	80	80	80

Para a simulação com os materiais acima descritos, foram adotados, como fixos, os seguintes parâmetros de injeção:

- a) Temperatura da massa plástica : 250 °C
- b) Temperatura do molde : 40 °C
- c) Espessura de parede : 1,85 mm

A Tabela 20 apresenta os resultados obtidos nesta etapa da avaliação.

Tabela 20 - Resultados da análise com variação das características do material (Fabricante Hüls)

Material	V214	V214	V314	V314	V325	V325
Tempo de injeção (s)	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Diâmet. ponto injeção (mm)	1,8	4,0	1,8	4,0	1,8	4,0
Volume total injeção (cm ³)	279,3	279,3	279,3	279,3	279,3	279,3
Vazão volumétrica (cm ³ /s)	55,9	55,9	55,9	55,9	55,9	55,9
Área projetada (cm ²)	814,0	814,0	814,0	814,0	814,0	814,0
PRESSÃO INJEÇÃO (bar/MPa)	373/ 37,3	357/ 35,7	266/ 26,6	257/ 25,7	272/ 27,2	256/ 25,6
FORÇA DE FECHAMENTO (ton)	245	232	172	170	171	169
TEMPER. MÁX. ATINGIDA (°C)	250	250	252	250	252	250
TEMPO DE RESFRIAMENTO (s)	16,5	16,5	16,5	16,5	16,0	16,0
CAMADA SOLIDIFICADA (%)	6,3	6,4	6,4	6,5	6,5	6,4

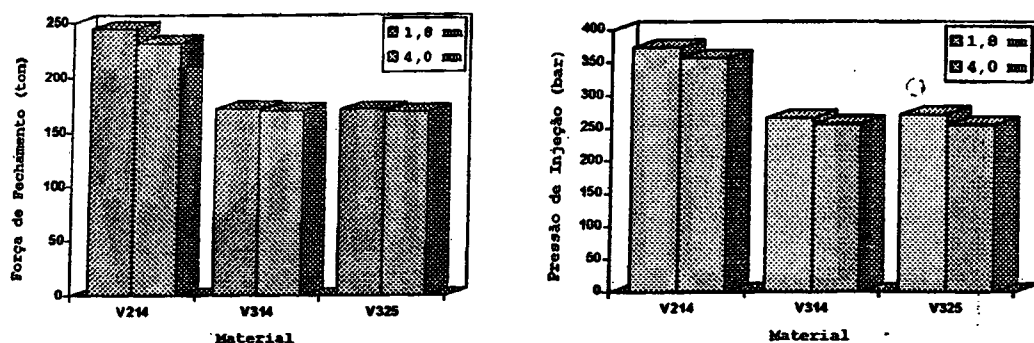


Figura 49 - Força de fechamento e pressão de injeção em função do material e do diâmetro do ponto de injeção

Pelos resultados apresentados na Tabela 20 e Figura 49, é possível verificar que os materiais V314 e V325 requerem, em relação ao V214, menor pressão de injeção e, conseqüentemente, menor força de fechamento do molde. Isto se deve ao fato de que a viscosidade do V214 é maior, acarretando em um índice de fluidez consideravelmente menor que o do V314 e V325, como já demonstrado na Tabela 19.

Por outro lado, os valores de pressão de injeção e força de fechamento são muito semelhantes para os materiais V314 e V325. Com base neste fato, e considerando que:

- o custo do material V314 é menor que do V325 e;
 - a temperatura de congelamento do V314 é um pouco superior ao V325, facilitando a etapa de refrigeração,
- a seleção do material recai então para V314.

A Figura 50 apresenta um gráfico comparativo entre os valores dos parâmetros de injeção iniciais, utilizados pelo fabricante, e os resultados obtidos após a análise reológica da peça.

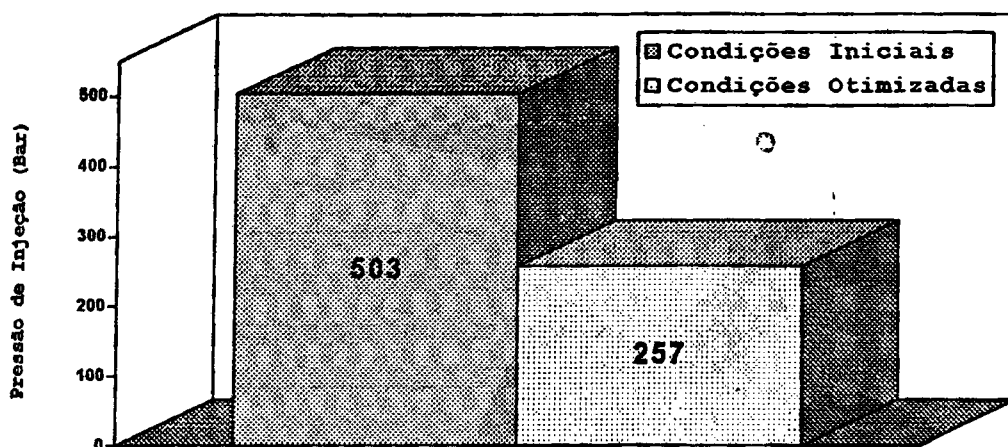


Figura 50 - Comparativo entre a pressão de injeção utilizada pelo fabricante e a obtida com parâmetros otimizados

6.3.7. Medidas Corretivas Sugeridas

Com os resultados, obtidos nas diversas simulações, dispõe-se de um conjunto de informações que permitem a adoção de algumas medidas corretivas, objetivando melhorar as condições de injeção. No caso da peça escaninho, foram apresentadas, ao fabricante, as seguintes sugestões:

- a) utilização do material Vestyron V314 ao invés do V214;
- b) reposicionamento do ponto de injeção, de 175 mm para 155 mm, em relação à base da peça, como mostra a Figura 46;
- c) elevação do tempo de injeção de 3 para 5 segundos;
- d) elevação da temperatura de injeção de 240 °C para 250 °C.

6.4. Comparativo TMConcept X Moldflow

A análise, realizada no Moldflow, partiu das condições otimizadas conseguidas com o TMConcept. As considerações adotadas no modelo geométrico anterior foram mantidas.

O modelo gerado pela introdução das coordenadas tridimensionais (x, y e z) dos pontos, refletiu, de forma mais fiel, a geometria da peça, uma vez que foi possível utilizar os melhores recursos de modelamento do programa de desenho do Moldflow. A Figura 51 mostra o modelo eletrônico construído no programa de modelamento do Moldflow. A Tabela 21 apresenta dados sobre os tempos consumidos e equipamentos empregados nesta fase.

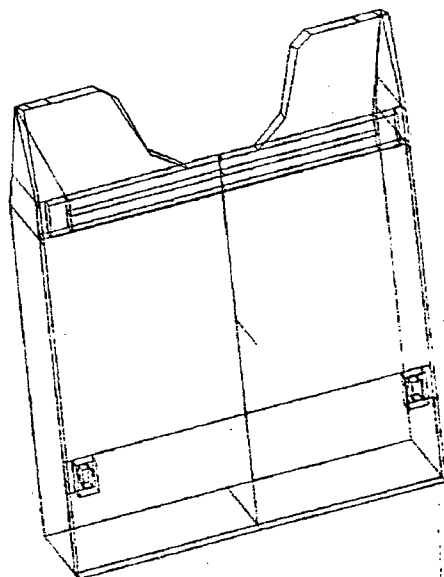


Figura 51 - Modelo de escaninho para papel gerado no Moldflow

A visualização, na tela do computador, do modelo geométrico gerado, da distribuição de pressão e da distribuição de temperatura na peça, é apresentada nas Figuras 52, 53 e 54, respectivamente.

Tabela 21 - Tempos e equipamentos para geração do modelo computacional no Moldflow

	Programa	Computador	Tempo
Geração da Geometria	Moldflow	SUN SparcStation II+	3,5 h
Transferência da Geometria	- - -	- - -	- - -
Determinação das Superfícies	Moldflow	SUN SparcStation II+	1,5
Geração da Malha	Moldflow	SUN SparcStation II+	2 min
Total	-	-	5,0 h

Os resultados obtidos, após a simulação, estão apresentados nas Tabelas 22 e 23 e na Figura 55. O tempo de processamento necessário ficou na faixa de 15 minutos.

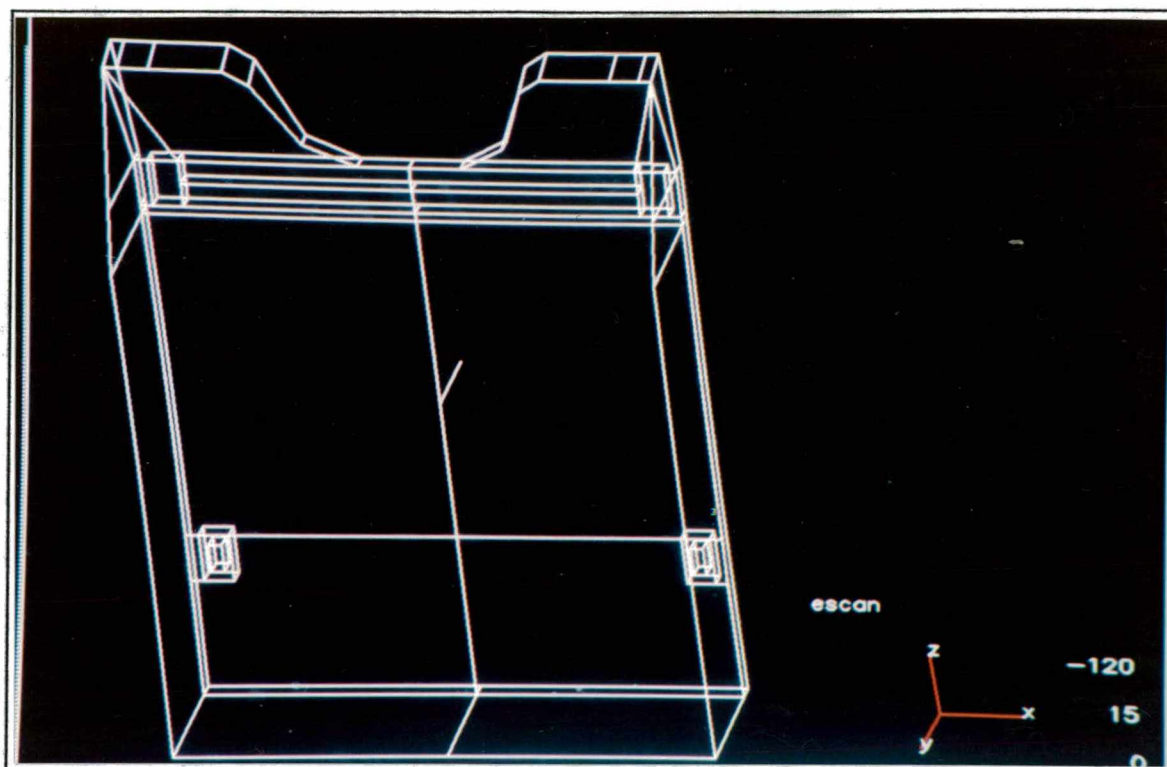


Figura 52 - Visualização do modelo geométrico (Programa Moldflow)

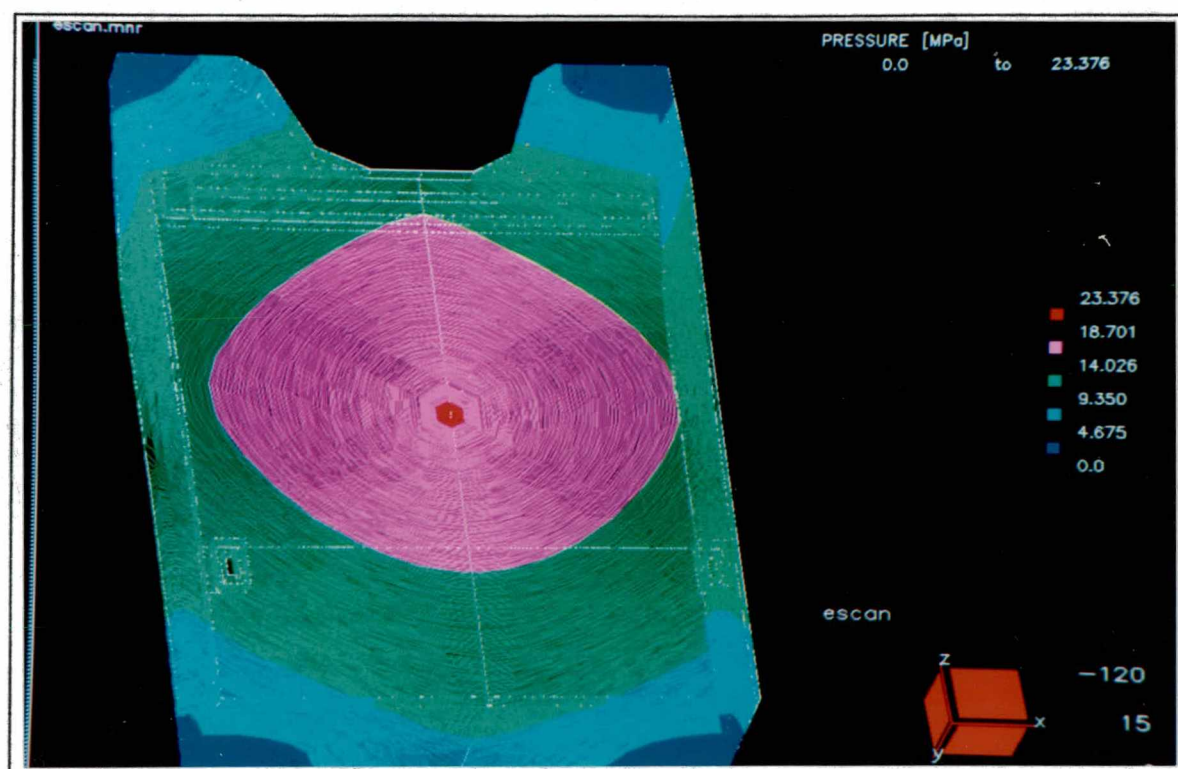


Figura 53 - Visualização da distribuição de pressão (Programa Moldflow)

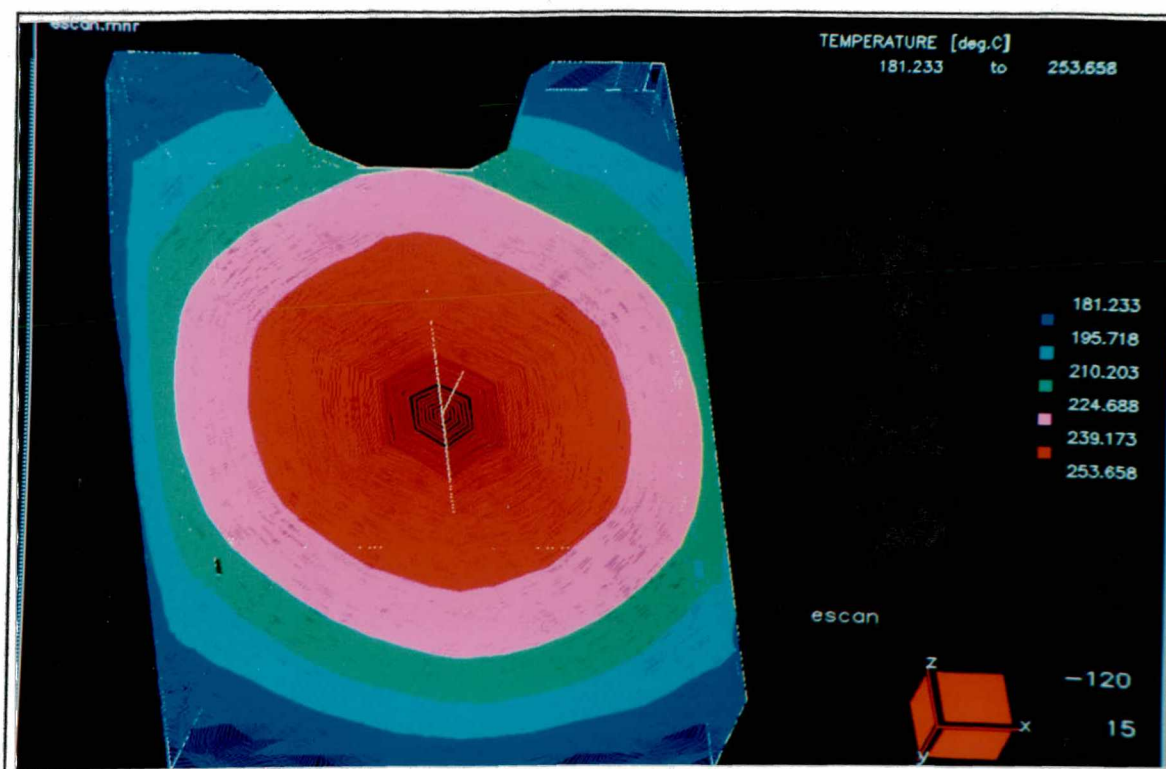


Figura 54 - Visualização da distribuição de temperatura (Programa Moldflow)

Tabela 22 - Resultados da análise comparativa entre TMConcept e Moldflow (Material PS V314/Hüls)

Programa	TMConcept	TMConcept	Moldflow	Moldflow
Temperatura do plástico (°C)	250	250	250	250
Temperatura do molde (°C)	40	40	40	40
Espessura de parede (mm)	1,85	1,85	1,85	1,85
Tempo de injeção (s)	5,0	5,0	5,0	5,0
Diâmet. ponto injeção (mm)	1,8	4,0	1,8	4,0
Volume total injeção (cm ³)	279,3	279,3	283,3	283,3
Vazão volumétrica (cm ³ /s)	55,9	55,9	56,7	56,7
Área projetada (cm ²)	814,0	814,0	814,2	814,2
PRESSÃO INJEÇÃO (bar/MPa)	266/ 26,6	257/ 25,7	234/ 23,4	205/ 20,5
FORÇA DE FECHAMENTO (ton)	172	170	153	150
TEMPER. MÁX. ATINGIDA (°C)	252	250	253	251
TEMPO DE RESFRIAMENTO (s)	16,5	16,5	7,85	7,79
CAMADA SOLIDIFICADA (%)	6,4	6,5	-	-

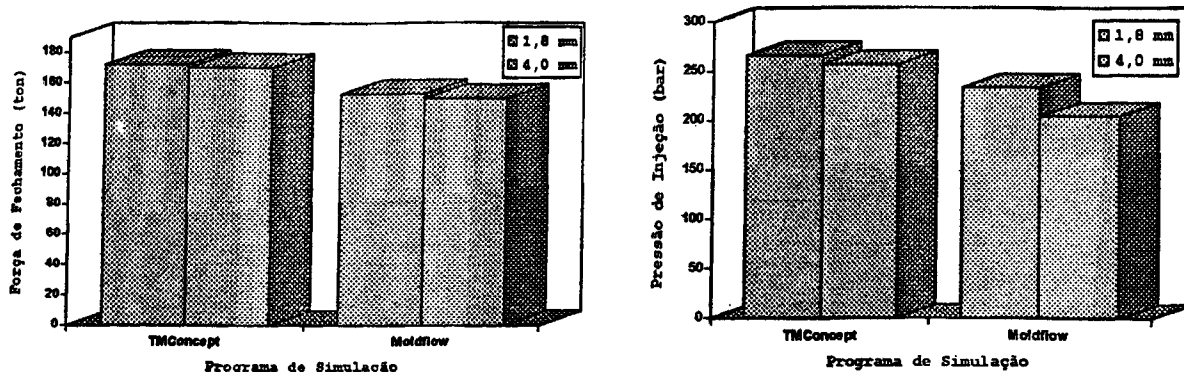


Figura 55 - Força de fechamento e pressão de injeção em função do diâmetro do ponto de injeção e do simulador utilizado

Tabela 23 - Variação percentual entre os resultados da análise comparativa TMConcept X Moldflow (diâmetro do ponto de injeção = 4 mm)

Programa	TMConcept	Moldflow	% TMC/MF
PRESSÃO INJEÇÃO (bar)	257	205	+ 25,37
FORÇA DE FECHAMENTO (ton)	170	150	+ 11,33

Deve-se considerar como elevada a variação nos resultados obtidos, uma vez que:

- o modelamento da peça foi gerado igualmente nos dois programas, através da introdução de coordenadas tridimensionais (x, y e z) da geometria;
- os parâmetros de injeção adotados foram idênticos.

Uma das causas desta divergência pode estar associada ao tipo de algoritmo utilizado pelos programas. Como já mencionado, no capítulo anterior, os métodos numéricos geram resultados aproximados.

A confiabilidade dos resultados obtidos, somente poderá ser verificada com um processo de avaliação prático dos sistemas de simulação. A injeção de uma peça real, em uma máquina injetora,

poderá fornecer informações que, se comparadas com os valores gerados na simulação, determinarão o nível de fidelidade dos resultados alcançados.

C A P Í T U L O 7

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1. Sugestões para Continuidade do Trabalho

Este trabalho pode servir de base para a elaboração de novas pesquisas na área de sistemas CAE/CAD, aplicados à produção de moldes de injeção para termoplásticos. Algumas sugestões são apresentadas a seguir.

A exploração minuciosa do sistema Moldflow, disponível no GRUCON, abrangendo todos os seus módulos (FLOW e COOL), se faz necessária. A possibilidade de avaliar os módulos de contração e empenamento (Shrinkage e Warpage) não deve ser descartada.

Parâmetros utilizados na máquina, durante a injeção de peças reais, devem ser confrontados com resultados obtidos a partir de simulações feitas no computador, afim de levantar, quão fielmente os sistemas CAE, de avaliação do fluxo, representam o processo prático de injeção de peças de plástico. Esta avaliação terá tanto maior validade, quanto maior fôr o número de programas de simulação analisados.

Uma avaliação detalhada dos programas (bases de dados) de acessórios padrão ("standards"), também trará grande benefício à indústria de moldes, no momento em que orientar os usuários sobre a forma e os recursos de utilização dos mesmos.

No Brasil, a indefinição e, em alguns casos, a duplicidade dos termos, gera dificuldades, tanto na comunicação entre as

áreas produtivas quanto na compreensão da nomenclatura, para o setor de plásticos. Um trabalho, envolvendo o levantamento acurado e o estudo minucioso da terminologia, com proposta de padronização, será, certamente, de grande valia.

Finalmente, em uma linha de pesquisa paralela, é recomendada a elaboração de um sistema computacional que permita transformar modelos volumétricos em modelos em casca. Desta forma, seria possível a geração da malha de elementos finitos, direta e automaticamente, pelo sistema CAD, reduzindo consideravelmente o tempo na etapa de projeto.

7.2. Conclusões

O Brasil, país em pleno desenvolvimento tecnológico, prepara-se para entrar no Mercado do Cone Sul, onde terá de concorrer com países em crescimento, como a Argentina e o Uruguai. Além disso, face a crescente internacionalização do mercado de transformação de plásticos, deverá elevar sua produtividade de forma rápida e constante.

Especialmente no setor de moldes, onde a exigência de alta produtividade, resultando na redução dos prazos de entrega, aliada a uma qualidade elevada é constante, a introdução de tecnologias modernas de CAE/CAD/CAM torna-se fundamental.

Atualmente, é pequena a utilização destes sistemas durante a fase de projeto. Normalmente, as simulações são realizadas apenas quando os meios convencionais não conseguem proporcionar resultados satisfatórios. Isto ocorre, muitas vezes, quando a ferramenta de injeção já está pronta, dificultando a execução de

possíveis alterações que se fizerem necessárias.

Este trabalho teve como principais objetivos, a introdução de alguns conceitos e técnicas de avaliação reológica do escoamento do plástico, além de propor uma metodologia de realização destas análises, por meio de sistemas CAE.

Sob o aspecto da implementação destas técnicas, deve-se considerar, de um lado, a melhoria na qualidade das peças produzidas e a obtenção de prazos de produção menores, e do outro, o alto investimento inicial necessário, tanto a nível de equipamentos/programas quanto de mão-de-obra especializada.

O usuário de sistemas de previsão do escoamento do plástico, em cavidades de moldes, deve possuir um bom conhecimento do processo de injeção, para que possa avaliar corretamente os resultados, qualitativos e quantitativos, de uma simulação. Adicionalmente, deverá possuir condições de manipular um sistema gráfico tridimensional, afim de modelar a peça a ser avaliada. A partir do momento em que a geometria de uma peça, gerada pelo projetista em um sistema CAD, puder ser utilizada diretamente (ou com apenas poucas alterações) pelo programa de elementos finitos, ter-se-á uma considerável economia de tempo, tornando bem maior a viabilidade técnica e econômica dos sistemas atuais.

O custo inicial elevado destes sistemas também é problemático para o setor, uma vez que a grande maioria dos fabricantes de moldes é de pequeno porte.

Por outro lado, além da economia conseguida com a otimização computadorizada da ferramenta, através da minimização das alterações e dos custos de produção, existem vantagens

adicionais do emprego de sistemas CAE, na avaliação do processo de injeção, quais sejam:

- grande segurança na orçamentação de moldes;
- definição do número ideal de cavidades;
- otimização dos parâmetros de injeção e;
- elevado nível de qualidade da peça.

Deve haver, de parte das instituições educacionais e da indústria de transformação de plásticos, maior preocupação com o treinamento de mão-de-obra qualificada. Isto será facilitado por um maior intercâmbio, tanto a nível nacional como mundial, entre empresa e instituição de ensino, no qual a primeira colabora com a experiência prática e, a segunda, com o conhecimento teórico e a introdução de novas tecnologias. É importante salientar que, de nada adianta a aquisição de modernos equipamentos e programas, sem a devida preparação de recursos humanos para utilizá-los.

A realização deste trabalho foi possível, graças a convênios de cooperação com instituições estrangeiras, que atuam no setor de CAE/CAD/CAM para a indústria de moldes há vários anos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BLASS, A.; "Processamento de Polímeros", 2a. Edição, 313p., Editora da UFSC, 1988, Florianópolis, SC, Brasil
- [2] DIHLMANN, C.; FERREIRA, A. C.; UEDA, H.; PEIXOTO, F. L.; "O Emprego de Sistemas CAE/CAD no Projeto de Moldes de Injeção de Peças Termoplásticas - Relato de Experiências de Cooperação", Anais do 2º Congresso Brasileiro de Polímeros, 5 a 8/Out/1993, São Paulo, SP, Brasil
- [3] PROVENZA, F.; "Moldes para Plásticos", Edição 1991, 210p., Editora F. Provenza, 1991, São Paulo, SP, Brasil
- [4] HARADA, J.; "Moldagem por Injeção - Projetos e Princípios Básicos", 1a. Edição, 202p., Medialdêa Editora Ltda., 1991, São Paulo, SP, Brasil
- [5] FERNANDES, J. L.; "Exportações Portuguesas de Moldes e Ferramentas Especiais - Ano de 1988", Revista O Molde, Número 5, pag. 15-17, Setembro/1989, Portugal
- [6] EDITOR; "Exportações e Importações Portuguesas de Moldes - Ano de 1989", Revista O Molde, Número 9, Setembro/1990, Portugal
- [7] VARGAS, R. B.; "Presente y Futuro Industria del Plastico Mexico y America 1993", Instituto Mexicano del Plastico Industrial, 1993, México

- [8] MANNESMANN Demag Ltda, PIC Petersen & Cia. Ltda.; "A Injeção em Poucas Palavras: Processos, Materiais e Equipamentos", 1a. Edição, 114p., 1989, Brasil
- [9] SCHINK, K.; "Evaluation, Ergänzung und Anpassung von Low-Cost-CAD/CAM-Systemen für mittelständische Kunststoff-Verarbeitungs- und Werkzeugbaubetriebe", 77p., SKZ - Süddeutsches Kunststoff-Zentrum, Janeiro/1990, Würzburg, Alemanha
- [10] FUJII, F.; "CAE/CAD/CAM - Uma Decisão Inteligente", Revista Plásticos em Revista, Abril/1992, Brasil
- [11] SAKAGUTI, E. Y.; DIHLMANN, C.; FERREIRA, A. C.; "Simulação do Preenchimento de Cavidades em Moldes de Injeção para Termoplásticos - Estudo de Caso", IX Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia - CRICTE/93, 4 e 5/Nov/1993, Santa Maria, RS, Brasil
- [12] POUZADA, A. S.; BRITO, A. M.; "Simulação de Fluxo em Moldes de Injecção - Utilização do Programa MF/Flow", Revista O Molde, Número 12, pag. 13-16, Junho/1991, Portugal
- [13] SCHINK, K.; "Auslegungsstrategien für die Formteil- und Werkzeugkonstruktion bei Anwendung von PC-Programmen", SKZ-Süddeutsches Kunststoff-Zentrum, 1991, Würzburg, Alemanha
- [14] DOMINGUES, S.; HONMA, C. M.; "Introdução de Ferramentas CAE/CAD/CAM no Projeto e Manufatura de Moldes para Injeção de Plásticos", V Congresso Anual da ABUSI, 1990, São Paulo, SP, Brasil

- [15] MATOS, A. D.; **"Organização da Fabricação da Indústria de Moldes"**, Anais do I Congresso da Indústria de Moldes, pag. 345-349, 28-30/Janeiro/1983, Marinha Grande, Portugal
- [16] OHM, H.; WOHLRAB, J.; **"Rationalisierungsmöglichkeiten bei der Durchführung von rheologischen Prüfungen und Anwendung der Werte bei der Formteilauslegung"**, SKZ - Süddeutsches Kunststoff-Zentrum, 1991, Würzburg, Alemanha
- [17] EHRENSTEIN, G. W.; BOHM, D.; KRAMER, E.; ONASCH, J.; SCHMACHTEMBERG, E.; STEINBICHLER, G.; **"Konstruieren mit Kunststoffen"**, Technische Akademie Esslingen, Apostila de Curso, Janeiro/1989, Alemanha
- [18] FILZ, P.; **"Spritzgießprozeß Simulieren"**, Industrie Anzeiger, Número 48, 1989, Alemanha
- [19] MENGES, G.; MOHREN, P.; **"Anleitung für den Bau von Spritzgießwerkzeugen"**, 3a. Edição, 575p., Carl Hanser Verlag, 1991, München, Alemanha
- [20] NEDEß, Chr.; KOSIN, Th.; **"Simulationsprogramme für das Spritzgießen auswählen"**, Revista Kunststoffe, Número 6, Carl Hanser Verlag, 1992, München, Alemanha
- [21] STEINMETZ, G.; **"CAD/CAM - Anwendung zum rechnerintegrierten Spritzgießen Werkzeugauslegung, Prozeßsimulation und Maschineneinstellung"**, Revista CAD-CAM-CIM, Carl Hanser Verlag, Maio/1987, München, Alemanha
- [22] BANGERT, H.; **"Vorausbestimmen des Fließfrontverlaufs in Spritzgießwerkzeugen - Anwendung der Füllbildmethode auf Grundfälle und einfache Formteile"**, Revista Kunststoffe, Número 6, Carl Hanser Verlag, 1985, München, Alemanha

- [23] BANGERT, H.; "Vorausbestimmen des Fließfrontverlaufs in Spritzgießwerkzeugen - Anwendung der Füllbildmethode bei komplexere Formteile", Revista Kunststoffe, Número 12, Carl Hanser Verlag, 1985, München, Alemanha
- [24] BERNHARDT, E. C.; "CAE - Computer Aided Engineering for Injection Molding", Carl Hanser Verlag, 1983, München, Alemanha
- [25] BANGERT, H.; PAFFRATH, H. W.; WÜBKEN, G.; "Computer Aided Engineering (CAE) in Plastics Technology", Revista Industrial & Production Engineering, Número 2, pag. 99-108, 1983, E.U.A.
- [26] IKV - Institut für Kunststoff-Verarbeitung, "CADMOULD-MEFISTO Version 2.0/87 - Programmbeschreibung", IKV, 1987, Aachen, Alemanha
- [27] SDRC; "I-DEAS Master Series - Product Catalog", SDRC - Structural Dynamics Research Corporation, Março/1993, E.U.A.
- [28] AUSTIN, C.; "Warpage Design Principles - Making Accurate Plastic Parts", Moldflow Pty Ltd, 1991, Victoria, Austrália
- [29] Catálogo da Moldflow; "An Introduction to Moldflow's Shrinkage and Warpage Analysis Software", Moldflow Pty Ltd, Victoria, Austrália
- [30] STEINMETZ, G.; "CAD/CAM - Anwendung beim rechnerintegrierten Spritzgießen - Voraussetzungen und Parameter zur Schwundberechnung", Revista Kunststoffe, Número 77, Carl Hanser Verlag, 1987, München, Alemanha

- [31] BAPTISTA, A.; "Algumas Notas sobre Plásticos", Anais do I Congresso da Indústria de Moldes, pag. 251-259, 28-30/Janeiro/1983, Marinha Grande, Portugal
- [32] BASF AG; "Kunststoff-Werkstoffe im Gespräch: Aufbau und Eigenschaften", 2a. Edição, BASF, Ludwigshafen, Alemanha
- [33] MICHAELI, W.; GREIF, H.; KAUFMANN, H.; VOSSEBÜRGER, F-J; "Technologie der Kunststoffe: Lern- und Arbeitsbuch für die Aus- und Weiterbildung", 1a. Edição, 182p., Carl Hanser Verlag, 1992, München, Alemanha
- [34] BASF AG; "Kunststoff-Physik im Gespräch", 7a. Edição, BASF, 1988, Ludwigshafen, Alemanha
- [35] POUZADA, A. S.; "Termoplásticos para Injecção", Revista O Molde, Número 11, pag. 15-17, Março/1991, Portugal
- [36] BRITO, A. M.; POUZADA, A. S.; "Moldes de Injecção Termoplásticos", Revista O Molde, Número 4, pag. 7-12, Junho/1989, Portugal
- [37] THYSSEN EDELSTAHLWERKE AG., "Werkzeugstähle - Thyrodur, Thyroplast, Thyrotherm", 146p., 1990, Krefeld, Alemanha
- [38] GODINHO, L.; "Comportamento Funcional de uma Peça de Plástico Moldado", Anais do I Congresso da Indústria de Moldes, pag. 211-217, 28-30/Janeiro/1983, Marinha Grande, Portugal
- [39] GRANJA, D.; "Tratamentos Térmicos de Elementos Moldantes em Aço", Anais do I Congresso da Indústria de Moldes, pag. 291-298, 28-30/Janeiro/1983, Marinha Grande, Portugal
- [40] Instituto Superior Técnico; "Fabrico Rápido de Protótipos", 1992, Lisboa, Portugal

- [41] SOUSA, J. M.; FERNANDES, J. L.; "Estereolitografia Laser", Revista O Molde, Número 5, pag. 29-31, Setembro/1989, Portugal
- [42] DIHLMANN, C.; "Stereolitografia: Criação de Peças Plásticas Através de Laser", Trabalho do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - CPGEM/UFSC, Maio/1990, Florianópolis, SC, Brasil
- [43] GUERRA, P.; "Optimização do Número de Cavidades de um Molde", Revista O Molde, Número 10, pag. 32-36, Dezembro/1990, Portugal
- [44] MENGES, G.; BENFER, W.; BAUR, E.; "Rechnerintegrierte Prozeßgestaltung beim Spritzgießen", IKV - Institut für Kunststoffverarbeitung, 1991, Aachen, Alemanha
- [45] SOUSA NETO, H. J.; "Especificações Técnicas Gerais para Moldes de Injeção de Matérias Plásticas", Anais do I Congresso da Indústria de Moldes, pag. 219-230, 28-30/Janeiro/1983, Marinha Grande, Portugal
- [46] GASTROW, H.; "Moldes de Inyeccion para Plasticos en 100 Casos Praticos", 1a. Edição, Hanser Editorial, 1992, Barcelona, Espanha
- [47] Catálogo da Kenner; "Tooling - Policies & Procedures", Kenner Products Company, Novembro/1982, E.U.A.
- [48] Prospecto Hoechst; "Richtlinien für das Gestalten von Formteilen aus technischen Kunststoffen", Hoechst Aktiengesellschaft, Julho/1992, Alemanha
- [49] Prospecto Hoechst; "Gestalten von Formteilen aus technischen Kunststoffen", Hoechst Aktiengesellschaft, Abril/1991, Alemanha

- [50] Prospecto Hoechst; **"Berechnen von Schnappverbindungen mit Kunststoffteilen"**, Hoechst Aktiengesellschaft, Abril/1991, Alemanha
- [51] MIRANDA, H. J. A.; SILVA, R. M. F.; **"Sistemas de CAD/CAM na Indústria de Moldes - Ficção e Realidade"**, Revista O Molde, Número 6, pag. 44-48, Dezembro/1989, Portugal
- [52] EDITOR; **"SerMOLD Software Português para Desenho de Moldes"**, Revista Reviproject, Número 25, pag. 27, Novembro/1991, Portugal
- [53] SORINTEL LDA., **"Software Português para Desenho de Moldes"**, Revista O Molde, Número 13, pag. 19-28, Setembro/1991, Portugal
- [54] EDITOR; **"Graftek: O CAD/CAM/CAE Integrado"**, Revista Reviproject, Número 25, pag. 23, Novembro/1991, Portugal
- [55] EDITOR; **"Duct CAD/CAM Integrado e Modular"**, Revista Reviproject, Número 25, pag. 34, Novembro/1991, Portugal
- [56] Prospecto da INTERGRAPH, **"Technical Overview"**, Abril/1991
- [57] FERRETI, M.; **"Integração da Produção"**, Ipesi - Negócios & Informática, Agosto/Setembro/1991, pag. 55-60, Brasil
- [58] EDITOR, **"Power auf PCs - 2D/3D Werkzeug für Design und Konstruktion"**, Revista KEM Konstruktion Elektronik Maschinenbau, Número 9, Konradin Verlag, 1992, Leinfelden, Alemanha
- [59] EDITOR; **"Cadkey Software CAD Multiplataformas"**, Revista Reviproject, Número 25, pag. 31, Novembro/1991, Portugal
- [60] EDITOR; **"SmartCAM Software para Programação de Máquinas CNC"**, Revista Reviproject, Número 25, pag. 33, Novembro/1991, Portugal

- [61] EDITOR; **"CAD-Anwendung auf Mikro"**, CAD-CAM Report, Número 8, 1986, Alemanha
- [62] Prospecto da Genius CAD-Software GmbH; **"Genius-Mold"**, 1992, Amberg, Alemanha
- [63] **Manual do Usuário Microstation; SISGRAPH**
- [64] EDITOR; **"Projecto de Peça Plástica Assistido por Computador"**, Revista O Molde, Número 4, pag. 43-45, Junho/1989, Portugal
- [65] KNAPPE, W.; LAMPL, A.; HEUEL, O.; **"Kunststoff-Verarbeitung und Werkzeugbau"**, Carl Hanser Verlag, 1992, München, Alemanha
- [66] SCHINK, K.; **"EDV als Hilfsmittel für die Konstruktion"**, Curso Konstruieren mit Kunststoffen, Technische Akademie Esslingen, 22-23/04/1991, Ostfildern (Nellingen), Alemanha
- [67] FILZ, P.; **"Neue Entwicklungen für die Simulation des Spritzgießprozesses von Thermoplasten"**, Tese de Doutoramento, RWTH-Aachen, Dezembro/1988, Aachen, Alemanha
- [68] FERNANDES, J.; **"A Normalização Internacional de Moldes e seus Componentes"**, Revista O Molde, Número 13, pag. 11-13, Setembro/1991, Portugal
- [69] Catálogo da Eurotool; **"Heißkanal Technik"**, Eurotool GmbH Heißkanalsysteme, Bensheim, Alemanha
- [70] Catálogo da HASCO, HASCO-Normalien, 1992, Lüdenscheid, Alemanha
- [71] Manual da Polimold; **"Manual de Instruções - Catálogo Eletrônico Polimold Versão 1.3"**, 1991, Brasil

- [72] Catálogo da Bayer AG; "Die Idee, Der Weg, Das Ziel - Bayer Thermoplaste - von der Produktidee zur Serienreife", Bayer AG, Outubro/1992, Köln, Alemanha
- [73] FERNANDES, J. L. P.; "Levantamento Estatístico da Indústria de Moldes 1988/1989", Revista O Molde, Número 7, pag. 7-12, Março/1990, Portugal
- [74] BASF AG; "Kunststoff-Verarbeitung im Gespräch: 2-Extrusion", 4a. Edição, BASF, 1991, Ludwigshafen, Alemanha
- [75] BASF AG; "Kunststoff-Verarbeitung im Gespräch: 3-Blasformen", 1a. Edição, BASF, 1973, Ludwigshafen, Alemanha
- [76] BASF AG; "Kunststoff-Verarbeitung im Gespräch: 1-Spritzgießen", 6a. Edição, BASF, 1991, Ludwigshafen, Alemanha
- [77] AUSTIN, C.; "Moldflow Design Principles", Moldflow Pty Ltd, Victoria, Austrália
- [78] BANGERT, H.; DUNG, T.; STÄBLEIN, P.; "Rheologisches Auslegen eines Spritzgießwerkzeugs für einen Pkw-Kotflügel", Revista Kunststoffe 12, Carl Hanser Verlag, 1987, München, Alemanha
- [79] BANGERT, H.; "Systematische Konstruktion von Spritzgiesswerkzeugen und Rechnereinsatz", Tese de Doutoramento, RWTH-Aachen, Dezembro/1981, Aachen, Alemanha
- [80] KRETZSCHMAR, O.; "Rechnerunterstützte Auslegung von Spritzgießwerkzeugen mit segmentbezogenen Berechnungsverfahren", Dissertation an der RWTH Aachen, 1985, Aachen, Alemanha

- [81] STÄBLEIN, P.; "Füllbildkonstruktion", Seminar, 08 bis 09.04.1992, SKZ-Süddeutsches Kunststoff-Zentrum, Würzburg, Alemanha
- [82] MALISKA, C. R.; "Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional", Livro em elaboração, EMC/UFSC, 1993, Florianópolis, SC, Brasil
- [83] BEJAN, A.; "Convection Heat Transfer", A Wiley Interscience Publication, 1984
- [84] STITZ, S.; "Notas de Aula por Prof. Dr. Stitz", Fach-Hochschule Würzburg, 1992, Würzburg, Alemanha
- [85] EDITOR; "CAD/CAM System is Now More Powerful, Easier to Use", Revista Plastics Technology, Maio/1990, E.U.A.
- [86] Catálogo da Moldflow; "Moldmech - Software for the Analysis of Mold Deflections", Moldflow Pty Ltd, Victoria, Austrália
- [87] BREUER, H.; DUPP, G.; SCHMITZ, J.; TÜLLMANN, R.; "Einheitliche Werkstoffdatenbank - eine Idee setzt sich durch", Revista Kunststoffe, Número 11, Carl Hanser Verlag, 1990, München, Alemanha
- [88] Prospecto da Bayer AG; "Verarbeitungsdaten für den Spritzgießer - Thermoplaste", Bayer AG, Março/1988, Leverkusen, Alemanha
- [89] BASF; BAYER; HOECHST; HÜLS; "Campus Version 2 - Kunststoff-Datenbank", Bayer/Basf/Hoechst/Hüls, 1991, Alemanha
- [90] Prospecto da Rhône-Poulenc, "Physikalische, Thermische, Mechanische und Elektrische Eigenschaften der Polyamide", Rhône-Poulenc Chimie, Setembro/1992, Nanterre, França

- [91] IKV - Institut für Kunststoff-Verarbeitung; **"Anforderungen an eine moderne Werkstoffdatenbank"**, 15o. Kunststoff-technischen Kolloquiums des IKV, 14/15 de março de 1990, Aachen, Alemanha
- [92] BRINKMANN, Th.; **"Werkstoffinformationssysteme für die Kunststoffindustrie"**, Revista Kunststoffe, Número 2, Carl Hanser Verlag, 1990, München, Alemanha
- [93] **Prospecto da Moldflow**, Moldflow Vertriebs-GmbH, Köln, Alemanha
- [94] Folheto da ICTPOL - Instituto de Ciência e Tecnologia de Polímeros; **"Uma Instituição ao Serviço da Indústria de Moldes"**, 1992, Braga, Portugal
- [95] DIHLMANN, C.; **"Flaschenkasteanalyse mit TMConcept"**, Relatório Interno do SKZ - Süddeutsches Kunststoff-Zentrum, Outubro/1992, Würzburg, Alemanha
- [96] SAKAGUTI, E. Y.; DIHLMANN, C.; **"Análise do Preenchimento de Cavidades em Moldes de Injeção para Termoplásticos"**, Relatório Interno do GRUCON/UFSC, Agosto/1993, Florianópolis, SC, Brasil
- [97] **Manual do Programa Moldflow**, Moldflow Vertriebs-GmbH, Köln, Alemanha
- [98] SHAEFER, R.; SHERMAN, R.; **"Diagnosing and Eliminating Warpage"**, Revista Plastics Technology, pag. 80-83, Junho/1991, E.U.A.
- [99] NAGARSHETH, P.; MALAMPHY, G.; **"Warpage Simulation"**, Revista Appliance Manufacturer, pag. 52, Setembro/1992, E.U.A.

- [100] Catálogo da Plastics & Computers; "TMconcept - Expertensystem für den Spritzgießprozess", Plastics & Computers, Itália
- [101] PEIXOTO, F. L.; DIHLMANN, C.; FERREIRA, A. C.; "CAE/CAD/CAM Aplicado ao Projeto de Moldes de Injeção de Polímeros", IX Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia - CRICTE/93, 4 e 5/Nov/1993, Santa Maria, RS, Brasil
- [102] Prospecto da Moldflow, "Moldflow/Flow", Moldflow Pty. Ltd., Outubro/1990, Victoria, Austrália
- [103] DIHLMANN, C.; "Papierablageanalyse mit TMConcept", Relatório Interno do SKZ - Süddeutsches Kunststoff-Zentrum, Setembro/1992, Würzburg, Alemanha

ANEXOS

Material		Temperat Molde	Faixa de Temperat Plástico	Temperat Máxima Plástico	Tensão Máxima x 1000 Pa	Taxa Cisalh x 1000 1/s
Código	Descrição	°C	°C	°C		
ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno	50-80	190-270	280	300	50
EVA	Etileno Vinil Acetato	20	140-220	220	100	30
GPS	Poliestireno (uso geral)	10-80	90-280	280	250	40
HIPS	Poliestireno Alto Impacto	20	200-260	280	300	40
LDPE	Polietileno Baixa Densidade	20-60	170-260	280	100	40
HDPE	Polietileno Alta Densidade	20-60	190-305	280	200	40
PA6	Poliamida (Nylon 6)	60-95	230-280	320	500	60
PA66	Poliamida (Nylon 66)	60-95	260-320	360	500	60
PA612	Poliamida (Nylon 612)	80	230-280	320	500	60
PBTP	Polibutileno Tereftalato	30-90	220-270	300	400	50
PC	Policarbonato	60-120	270-320	320	500	40
PES	Polietersulfona	150	310-400	400	500	50
PETP	Polietileno Tereftalato	100	280-310	340	500	**
PMMA	Polimetil Metacrilato	10-80	180-260	280	400	40
POM	Polioximetileno poliformaldeído (Acetal)	40-120	190-240	240	450	**
PPO	Polifenileno óxido (modificado)	80	260-300	300	450	**
PPS	Polifenileno Sulfido	100	310-340	360	500	50
PP	Polipropileno	20-100	200-305	300	250	100
PSU	Polisulfona	100	330-400	420	500	50
PUR	Poliuretano	20	190-220	260	250	40
FPVC	Polivinil clorídrico Flexível	20-55	120-200	**	150	20
RPVC	Polivinil clorídrico Rígido	20-70	140-210	**	200	20
SAN	Estireno Acrilonitrila	40-80	200-270	280	300	40

Tabela A1 - Parâmetros admissíveis para os termoplásticos mais comuns [1, 4, 8, 19, 84]


Temperatura do Molde: Temperatura típica do molde, em Graus Celsius

Faixa de Temperatura Plástico: Faixa de temperatura típica para processamento (no "gate", acrescente 20°C)

Temperatura Máxima Plástico: Temperatura máxima de processamento antes que ocorra degradação do material

Stress Máximo: Tensão máxima na cavidade, dada em Pascal


Taxa Cisalhamento: Taxa de cisalhamento máxima no "gate", dada em 1/s

		GRUPO DE PESQUISA E TREINAMENTO EM COMANDO NUMÉRICO E AUTOMATIZAÇÃO INDUSTRIAL			Data: / / Folha: /		Folha 1 de 1
Firma:					Assinatura:		
Peça:					Observação:		
Superf Número	Ponto Número	X	Y	Z	Observação		

Folha A1 - Formulário para registro dos pontos da geometria da peça

[illegible]

Folha A2 - Formulário para registro de espessura, área e volume das superfícies

		GRUPO DE PESQUISA E TREINAMENTO EM COMANDO NUMÉRICO E AUTOMATIZAÇÃO INDUSTRIAL			Data: / /	
					Folha: /	
Firma:					Assinatura:	
Peca			Observacao			
ANALISE REOLOGICA		Ensalo No.	Ensalo No.	Ensalo No.	Ensalo No.	
Arquivo de Resultado						
Arquivo de Ferramenta						
Material/Fabricante						
Temperatura do Plastico (°C)						
Temperatura do Molde (°C)						
Tempo de Injecao (s)						
Espessura de Parede (mm)						
FORÇA DE FECHAMENTO (ton)						
MAXIMA PRESSAO DE INJECAO (bar)						
TEMPERATURA MAXIMA (°C)						
PERCENTUAL DE CAMADA SOLIDIFICADA CO						
TEMPO DE RESFRIAMENTO (s)						
Quantidade de Níveis de Enchimento						
Elemento de Entrada						
Diametro da Entrada (mm)						
Posicao de Injecao	X=					
	Y=					
	Z=					
Vazao Volumetrica (cm³/s)						

Folha A3 - Formulário para controle dos parâmetros de injeção utilizados e dos resultados obtidos